

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava**

**Fakulta strojní**

**Katedra automatizační techniky a řízení**

## **Alternativní zdroje energie pro napájení senzorů**

### **Alternative Power Sources for Sensors Power Supply**

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Mahdal, Ph.D.

Autor: Jan Bednář

Ostrava 2019

## Zadání bakalářské práce

Student: **Jan Bednář**  
Studijní program: **B3943 Mechatronika**  
Studijní obor: **3906R006 Mechatronické systémy**  
Téma: **Alternativní zdroje energie pro napájení senzorů**  
**Alternative Power Sources for Sensors Power Supply**  
Jazyk vypracování: **čeština**

### Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s alternativními zdroji napájení, jako jsou solární články, Peltierovy články a piezoaktuátory.
2. Změřte charakteristiky vybraných alternativních zdrojů napájení při definovaných vstupních podmínkách. Definujte jejich účinnost, výhody a nevýhody.
3. Popište jejich vlastnosti, typické použití, možnosti připojení k obvodům typu „Energy harvesting“.
4. Seznamte se s komerčními obvody, umožňující postupnou akumulaci energie a popište jejich vhodnost pro napájení nízkopříkonových zařízení.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky a jejich následné využití v praxi.

### Seznam doporučené odborné literatury:

EDVINSSON, Nils, 2013. Energy harvesting power supply for wireless sensor networks. Upsala Universitet, Teknisk-naturvetenskaplig fakultet UTH-enheten, 2013, pp. 68. ISSN: 1401-5757, TVE 13 058.  
KERNIGHAN, Brian W a Dennis M RITCHIE, 2006. Programovací jazyk C. Brno: Computer Press. ISBN 80-251-0897-x.  
KHARLAMOVA, N V, A I KHALYASMAA a S A EROSHENKO, 2017. Alternative power supply systems for remote industrial customers. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science [online]. 72 [cit. 2018-11-26]. DOI: 10.1088/1755-1315/72/1/012027. ISSN 1755-1307. Dostupné z: <http://stacks.iop.org/1755-1315/72/i=1/a=012027?key=crossref.85f96ff7f4c64816662c8976303abfef>.  
LTC3588 Datasheet, 2017. Nanopower energy Harvesting Power Supply [online]. Linear Technology 2017. [cit. 2017-10-11]. Dostupné z: <http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/35881fc.pdf>.  
NECHIBVUTE, Action, Albert CHAWANDA a Pearson LUHANGA, 2012. Piezoelectric Energy Harvesting Devices: An Alternative Energy Source for Wireless Sensors. Smart Materials Research [online]. 2012, 1-13 [cit. 2018-11-26]. DOI: 10.1155/2012/853481. ISSN 2090-3561. Dostupné z: <https://www.hindawi.com/archive/2012/853481/>.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Miroslav Mahdal, Ph.D.**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019





doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.  
vedoucí katedry



Ing. Zdeňka Chmelíková, Ph.D.  
prorektorka pro studium

### **Místopřísežné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 20.5.19.....

Bednár Jan.....

podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představenství a užití díla školního) a § 60 – školní dílo,
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- že užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- беру на вѣдомі, že - podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne

20.5.19

Bednár Jan

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Jan Bednár

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Amelinova 1371, Dolní Lutyně 735 53

## **Poděkování**

Děkuji svému vedoucímu práce panu Ing. Miroslavu Mahdalovi, Ph.D. a Ing. Pavlu Šuránkovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a věcné připomínky, jež jsem využil při vypracování této bakalářské práce. Dále bych chtěl také poděkovat své rodině a blízkým za podporu při studiu.

## **ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

BEDNÁŘ, J. *Alternativní zdroje energie pro napájení senzorů: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Univerzitní studijní programy, 2019, 58s., Vedoucí práce: Ing. Miroslav Mahdal, Ph.D.

Tato bakalářská práce pojednává o alternativních zdrojích energie pro napájení senzorů a měření charakteristik alternativních zdrojů napájení pro jednotky pracující na principech energy harvesting. Práce se zabývá teoretickým popisem použitelných druhů energie, funkčních principů a alternativních zdrojů napájení z hlediska jejich vlastností a nasazení v různých aplikacích. Dále je práce zaměřena na popis komerčních integrovaných obvodů typu energy harvesting určených ke zpracování energie z alternativních zdrojů energie. V práci jsou také obsaženy postupy měření charakteristik alternativních zdrojů energie a jejich měření při spojení s energy harvesting obvody.

### **Klíčová slova**

Sběr energie, Solární články, Termoelektrický Generátor, Piezoaktuátor, LTC3108

## **ANNOTATION OF BACHELOR THESIS**

BEDNÁŘ, J. *Alternative Power Sources for Sensors Power Supply: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, University program, 2019, 58p., Thesis head: Ing. Miroslav Mahdal, Ph.D.

This bachelor thesis deals with alternative energy sources for sensor power supply and measurement of alternative power supply characteristics for energy harvesting units. The thesis deals with the theoretical description of usable types of energy, functional principles and alternative power sources in terms of their properties and deployment in various applications. Furthermore, the work is focused on the description of commercial integrated energy harvesting circuits designed to process energy from alternative energy sources. The work also includes procedures for measuring the characteristics of alternative energy sources and their measurement in connection with energy harvesting circuits.

### **Keywords**

Energy harvesting, Solar cell, Thermoelectric generator, Piezoelectric Actuator, LTC3108

## Obsah

Seznam použitých zkratk a symbolů .....	8
1 Úvod .....	14
2 Energy harvesting .....	15
2.1 Zdroje energie .....	15
2.2 Fotovoltaika .....	17
2.3 Piezoelektricitá.....	19
2.4 Termoelektricitá .....	21
3 Aplikace v senzorice .....	23
4 Obvody typu energy harvesting .....	26
5 Měření charakteristik zdrojů energie .....	33
5.1 Solární články .....	33
5.2 Peltierův článek.....	39
5.3 Piezoaktuátor .....	41
6 Měření s LTC3108.....	49
6.1 Model v aplikaci MATLAB Simulink .....	49
6.2 Nabíjení superkapacitoru.....	50
6.3 Vybíjení superkapacitoru.....	51
7 Závěr .....	53
Použitá literatura .....	55
Seznam příloh .....	58

## Seznam použitých zkratk a symbolů

A/D	Analog/Digital – analogově/digitální,
A-V	ampér-voltová charakteristika,
AM	Air Mass,
BH03	kódové označení prototypu pneumatiky,
C1	vstup kapacitoru nábojové pumpy,
C2	vstup zatěžovacího kapacitoru,
COB	chip on board – čip na desce,
D0, D1	vstupy pro volbu výstupního napětí LTC 3588,
DC	Direct Current - stejnosměrný proud,
EH	energy harvesting – sběr energie,
FČ	fotovoltaický článek,
HVAC	Heating, Ventilation and Air Conditioning – topení, ventilace a klimatizace,
IO	integrováný obvod,
LAN	Local Area Network – lokální síť,
LDO	Low Dropout Linear Regulator – regulátor s nízkým úbytkem napětí,
LDS	Ling Dynamic Systems,
LED	Light-Emitting Diode – elektroluminiscenční dioda,
LTC	Linear Technology Corporation,
MPP	bod maximálního výkonu,
N	polovodič s elektronovou vodivostí,
NMOS	N-type Metal Oxide Semiconductor – unipolární tranzistor typu N,
P	polovodič s děrovou vodivostí,
P-V	výkon-voltová charakteristika,
P2P	hodnota špička-špička,



PEG	Piezo-Electric Generator – piezoelektrický generátor,
PGOOD	Power good – výstup probouzení externího zařízení,
PMOS	P-type Metal Oxide Semiconductor – unipolární tranzistor typu P,
P-N	rozhraní polovodiče typu P a polovodiče typu N,
PZ1, PZ2	vstup pro připojení piezoelementu,
PZT	olovo-zirkonát-titanát,
RMS	Root Mean Square – efektivní hodnota,
SW	vstup nebo výstup spínání tranzistoru,
TEG	Termo-Electric Generator – termoelektrický generátor,
USB	Universal Serial Bus – univerzální sériová sběrnice,
UVLO	Undervoltage Lockout – podpětíová blokáce,
V-A	volt-ampérová závislost,
VAUX	výstup usměrňovače,
$V_{IN}$	rozsah vstupního napětí,
VLDO	výstup regulátoru s nízkým úbytkem napětí,
$V_{OUT}$	primární výstup měniče,
$V_{OUT2}$	spínaný výstup měniče,
$V_{OUT2\_EN}$	vstup řízení funkce $V_{OUT2}$
VS1, VS2	vstupy pro volbu výstupního napětí LTC 3108,
VSTORE	výstup dodatečného jímacího kapacitoru,
$a$	zrychlení,
$A_{AKC}$	amplituda na straně akcelerometru,
$A_{LAS}$	amplituda na straně Dopplerova laseru,
$C$	kapacita,
$E_v$	intenzita osvětlení,

$E_{\text{EL}}$	elektrická energie,
$E_{\text{MECH}}$	mechanická energie,
$f$	frekvence,
$F_{\text{BUD}}$	budící síla,
$FF_{\text{MČ}}$	faktor plnění malého článku,
$FF_{\text{VČ}}$	faktor plnění velkého článku,
$g$	amplituda zrychlení,
$I_{\text{F}}$	proud v propustném směru,
$I_{\text{IN}}$	vstupní proud,
$I_{\text{R}}$	proud tekoucí rezistorem,
$I_{\text{Z}}$	proud zdroje,
$I_{\text{ZAT}}$	zatěžovací proud,
$I_{\text{ZKR}}$	zkratový proud,
$k$	zesílení,
$k_{\text{f}}$	piezoelektrický coupling faktor,
$L_{\text{sek}}$	indukčnost sekundárního vinutí,
$m$	hmotnost,
$P$	výkon,
$P_{\text{BUD}}$	výkon budící síly,
$P_{\text{IN}}$	vstupní výkon,
$P_{\text{MPP}}$	bod maximálního výkonu,
$P_{\text{MPP1}}$	bod maximálního výkonu malého článku,
$P_{\text{MPP2}}$	bod maximálního výkonu velkého článku,
$P_{\text{rad}}$	vstupní intenzita záření,
$P_{\text{TEG}}$	výkon termoelektrického generátoru,
$P_{\text{TOP}}$	výkon topného článku,
$Q$	teplo,

$Q_{\text{MAX}}$	teplo dodané topným článkem,
$R_Z$	zatěžovací rezistor,
$s$	tloušťka stěny,
$S$	plocha,
$S_{\text{MČ}}$	plocha malého solárního článku,
$S_{\text{MČ}}$	plocha velkého solárního článku,
$T_C$	teplota chromatičnosti,
$t$	teplota, čas,
$t_1$	teplota teplé strany termoelektrického generátoru,
$t_2$	teplota studené strany termoelektrického generátoru,
$t_{\text{NAB}}$	celková doba nabíjení,
$t_{\text{PGOOD}}$	doba změny napěťové úrovně na pinu PGOOD,
$t_{\text{VOUT}}$	doba nabíjení kapacitoru na výstupu VOUT,
$t_{\text{VSTORE}}$	doba nabíjení kapacitoru na výstupu VSTORE,
$t_{\text{VYB}}$	doba vybíjení,
$U_0$	napětí naprázdno,
$U_{\text{IN}}$	vstupní napětí,
$U_R$	napětí na rezistoru,
$U_Z$	napětí zdroje,
$v$	okamžitá rychlost,
$y$	okamžitá výchylka,
$y_m$	maximální výchylka,
$\lambda$	součinitel tepelné vodivosti materiálu,
$\pi$	Ludolfovo číslo,
$\eta$	účinnost,
$\eta_{\text{MČ1}}$	odhad účinnosti malého solárního článku,

$\eta_{M\check{C}2}$	účinnost malého solárního článku,
$\eta_{SV}$	účinnost světelného zdroje,
$\eta_{TEG}$	účinnost termoelektrického generátoru,
$\eta_{V\check{C}1}$	odhad účinnosti velkého solárního článku,
$\eta_{V\check{C}2}$	účinnost velkého solárního článku,
$\Phi$	světelný tok,
$\Phi$	úhel vyzařování světla,
$\omega$	úhlová frekvence,
$\Delta_A$	rozdíl amplitud,
$\Delta_t$	rozdíl teplot,

A	jednotka elektrického proudu,
cd	jednotka svítivosti,
Hz	jednotka frekvence,
kg	jednotka hmotnosti,
lm/W	jednotka světelné účinnosti,
lx	jednotka intenzity osvětlení,
m	jednotka délky,
m <sup>2</sup>	jednotka obsahu,
m · s <sup>-1</sup>	jednotka rychlosti,
m · s <sup>-2</sup>	jednotka zrychlení,
N	jednotka síly,
nF	jednotka elektrické kapacity,
rad · s <sup>-1</sup>	jednotka uhlové frekvence,
s	jednotka času,
V	jednotka elektrického napětí,
W	jednotka výkonu,

$\text{W/m}^2$	jednotka intenzity záření,
$\Omega$	jednotka elektrického odporu.

# 1 Úvod

S rozvojem automatizace a techniky řízení se neustále zvyšují požadavky na miniaturizaci a autonomii senzorických systémů. Tyto elektrické systémy je ovšem také zapotřebí napájet. V dnešní době již máme k dispozici akumulátory o vysoké energetické hustotě, ovšem jejich použití není vždy zcela možné. Typicky z důvodů teplotních extrémů, případně kvůli požadavku na umístění do nepřístupných prostor, kde jsou technické zásahy složité, ba prakticky nemožné. V takovém případě je vhodné použít takové zdroje energie, které baterii do jisté míry nahradí a zajistí bezúdržbový provoz.

Tato bakalářská práce se tak zabývá alternativními zdroji napájení a jejich možnostmi pro napájení senzorů, případně senzorových sítí. Cílem práce je změřit charakteristiky jednotlivých zdrojů energie, porovnat je a definovat jejich výhody či nevýhody. Dále jsou jednotlivé zdroje připojeny k obvodům typu energy harvesting a jsou porovnány z hlediska schopnosti napájet tyto komerčně dostupné obvody, jež jsou určeny ke zpracování energie z těchto zdrojů. V rámci této práce jsou tak popsány veškeré postupy použité pro dosažení těchto výsledků.

## 2 Energy harvesting

Pojem *energy harvesting* můžeme volně přeložit jako *sběr energie*. Jedná se o inovativní odvětví získávání i toho nejmenšího množství energie ze zdrojů jako jsou tlak, vibrace, okolní teplota nebo proudění vzduchu. Ve většině případů se pod tímto termínem rozumí získávání elektrické energie z okolních zdrojů, které produkují velmi malé množství energie, případně nejsou dostatečně efektivní a kvalitní k produkci většího množství energie [1]. Takové množství energie tedy nelze využít k napájení složitých struktur odebírajících vysoké množství proudu. Hlavním důvodem pro použití různých metod *energy harvesting* jako zdroje energie tedy není vysoký výkon, ale výhoda v podobě omezení a eliminace závislosti na galvanických článcích, které jsou z hlediska jejich životnosti limitujícím faktorem a po určité době je nutná jejich výměna a recyklace. Největšího uplatnění těchto zdrojů tak nalézáme v napájení nízkopříkonových zařízení, konkrétně bezdrátových senzorů a zařízení, která jsou kompletně nezávislá na přívodu elektrického napětí nebo proudu a nevyžadují servisní zásahy po celou dobu životnosti kontrolovaného zařízení. Z logického úsudku tak vyplývá, že takové obvody mohou být umístěny i na nebezpečných, špatně přístupných nebo až nedostupných místech. Typicky se tedy tyto senzory mohou nacházet uvnitř nerozebíratelných strojních celků, v nádržích, atd. Můžeme tak například pomocí tenzometrů zajistit kontrolu namáhaných součástí strojního celku proti nadměrnému zatížení a zároveň omezit časté technické prohlídky pro kontrolu správné funkce a tím tak snížit celkové provozní náklady [1].

### 2.1 Zdroje energie

Jak je uvedeno výše, alternativní zdroje typu *energy harvesting* nabývají mnoha podob. V anglickém jazyce bývají označovány jako *ambient energy sources*. Volným překladem je tak můžeme nazývat *zdroje okolní energie*. V principu tím chápeme zachytávání energie prostředí, která by jinak byla ztracena jako teplo nebo pohyb. V současné době patří mezi ty nejhojněji využívané zdroje mechanické namáhání (vibrace), fotovoltaika (sluneční osvit) a teplo (teplotní difference) [1]. K uchovávání energie slouží akumulátor nebo kapacitor, který je těmito zdroji dobíjen. Každý zdroj nalézá uplatnění v rozdílných aplikacích, které závisí na provozních podmínkách a požadavcích na umístění senzorů. Výstupní výkon je v zásadě velmi malý a pohybuje se v řádu  $\mu\text{W}$  až  $\text{mW}$  [2], v závislosti na použitém zdroji energie, umístění a mnoho dalších aspektech.

Každý z principů energy harvesting tedy vychází z druhu energie, která je pro práci generátoru použita. Pro každý princip je tak určen jiný prvek schopný určitý typ energie principiálně přeměnit na elektrickou energii v podobě elektrického napětí. Samotné prvky se liší také typem napětí, které produkují. U solárních článků a termoelektrických generátorů nedochází k rychlým změnám jejich výstupu v závislosti na jejich zdroji energie. Když přerušíme zdroj slunečního světla pro solární článek, přestane produkovat energii. Při vypnutí ohřevu jednoho konce termoelektrického generátoru, produkuje energii pouze do doby ustálení obou konců na stejnou teplotu. Z podstaty vstupní energie, na kterých jsou závislé, tak oba zdroje produkují stejnosměrné napětí a můžeme je tedy označit za stejnosměrné zdroje energie. Naopak pro piezoelektrický generátor platí, že změna jejich vstupní energie (vibrací) je velice rychlá, respektive frekvence vibrací musí být dostatečně vysoká k tomu, aby vůbec došlo k produkci dostatečného množství elektrické energie potřebné pro napájení různých zařízení. Z frekvence vibrací poté vychází, jak rychle se bude deformovat daný piezoelektrický element. Z podstaty deformace piezoelektrických materiálů tedy můžeme říci, že piezoaktuátory produkují střídavé napětí.

### **Solární energie**

Obrovské množství energie produkované Sluncem bývá označováno jako solární energie. Je produktem termojaderné fúze probíhající na hvězdě naší sluneční soustavy již od jejího vzniku. Za vysokého tlaku a teploty dochází při termojaderné fúzi ke spalování vodíku na hélium. Vyprodukovaná energie je poté vymrštěna do všech směrů v podobě tepla a světla. V daleké budoucnosti však nastane nedostatek vodíku, v jehož důsledku dojde k pomalému zániku Slunce. Tato situace ovšem nastane až za několik miliard let – můžeme tak sluneční energii považovat za obnovitelný zdroj energie. Ke zpracování solární energie využíváme fotovoltaické články s využitím fotovoltaického jevu [3].

### **Mechanické namáhání**

Mechanické namáhání ve většině případů vzniká rozvibrováním různých materiálů. Kinetická energie vibrací je zachycována pomocí mechanicko-elektrických převodníků. Ty mohou pracovat na elektromagnetickém, elektrostatickém nebo piezoelektrickém principu. V případě piezoelektrického principu používáme piezoelektrické generátory (PEG), které s využitím piezoelektrického jevu produkují elektrickou energii v závislosti na velikosti a frekvenci jejich deformace [2].



## **Teplotní difference**

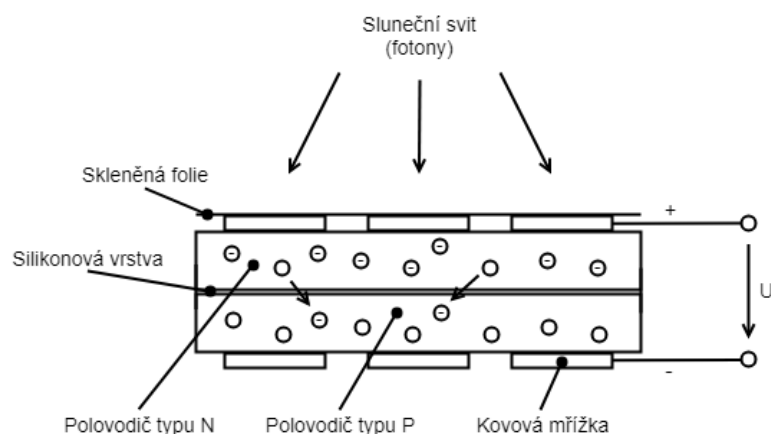
K převodu tepelné energie na elektrickou pomocí termoelektrických generátorů (TEG) využíváme teplotní difference či teplotního gradientu dvou různých materiálů. Pracují na principu termoelektrických jevů. Mezi nejznámější termoelektrické jevy patří Seebeckův jev a Peltierův jev. Oba jevy jsou pouze rozdílnou interpretací stejného fyzického procesu. To znamená, že jsou sobě inverzní a někdy je tak nazýváme jednotně jako Seebeckův-Peltierův jev. Nevýhodou je velice nízká efektivita pohybující se v řádu několika procent [1].

## **2.2 Fotovoltaika**

Fotovoltaika je přímým druhem přeměny solární energie na elektrickou energii. Pracuje na principu fotovoltaického jevu, který byl objeven francouzským fyzikem Henrim Becquerelem v roce 1839. Obecně je fotovoltaika definována jako vznik elektrického napětí mezi dvěma polovodiči typu P a N za předpokladu na ně dopadajícího slunečního záření. V obecném měřítku se jedná o zavedený způsob získávání elektrické energie. Princip spočívá ve využití sluneční energie a přeměně slunečního záření na elektrickou energii pomocí fotovoltaického jevu. Množství produkované energie se odvíjí od velikosti ozařované plochy. V rámci energy harvestingu tak narážíme na problém, kdy vzhledem k rostoucí integraci a zmenšování zařízení, může být velikost osvětlené plochy nedostatečná pro napájení zařízení. Dále nemohou být fotovoltaické články použity na místech s nulovým nebo nedostatečným osvětlením, jako jsou vnitřní prostory budov a hustě zastavěné plochy [3].

### **Fotovoltaický jev**

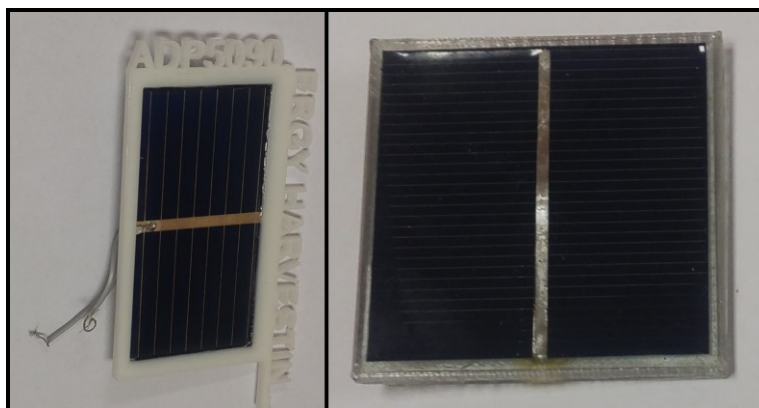
Fotovoltaický jev je důsledkem dopadu slunečního záření na rozhraní dvou polovodičů s rozdílným typem vodivosti (typu P a N). Sluneční záření je tvořeno fotony, které jsou zároveň nosiči energie. Při dopadu fotonu na rozhraní, předá foton svou energii elektronu nacházejícím se v polovodiči typu N a dojde tak k uvolnění elektronu z jeho krystalické mřížky. Na místě uvolněného elektronu vzniká tak zvaná díra, kterou je možné považovat za elementární kladný náboj. Volné elektrony se začnou přesouvat ke kladnému polovodiči typu P, přičemž přenášejí elektrickou energii v podobě průtoku elektrického proudu [3][4].



**Obrázek 1** *Princip fotovoltaiky (převzato a upraveno z [4])*

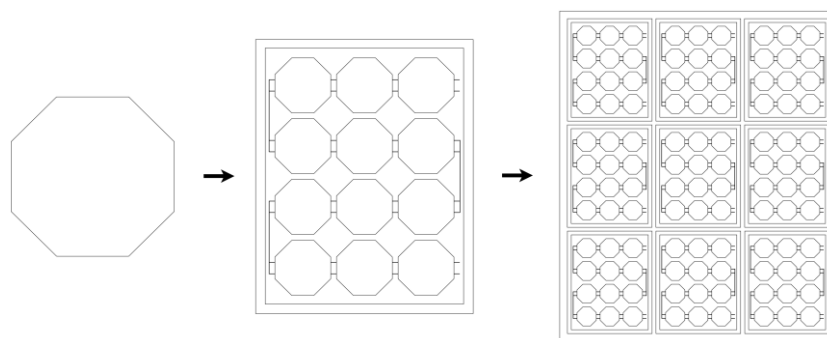
### Solární články

Solární články využívají ke své funkci sluneční energii. Jedná se o metodu přeměny slunečního záření na elektrickou energii pomocí fotovoltaického jevu. Prakticky se jedná o velkoplošné polovodičové diody. Jejich základem je křemíková deska s vodivostí typu P, jejíž povrch se při výrobě pokryje tenkou vrstvou polovodiče typu N a vytvoří se tak P-N přechod. Působením slunečního záření vznikne v polovodiči fotovoltaický jev. Díky tomu se z krystalické mřížky polovodiče začnou uvolňovat volné elektrony a na P-N přechodu tak vznikne elektrické napětí [3][4].



**Obrázek 2** *Malý solární článek (vlevo), velký solární článek (vpravo)*

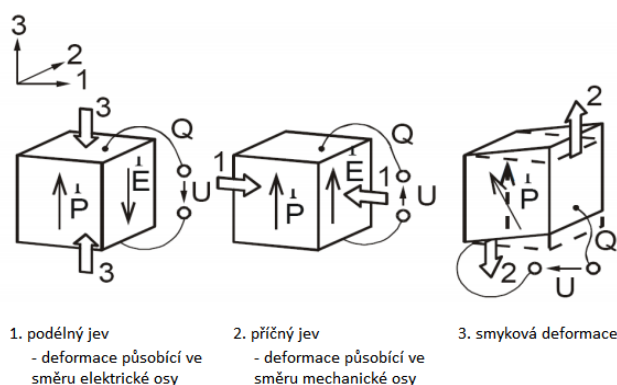
Proud produkovaný solárním článkem je přímo úměrný velikosti ozařované plochy, kdy výkon křemíkového solárního článku o ploše  $1 \text{ m}^2$  je za ideálních podmínek, tedy maximálních osvětlení a účinnosti, asi 70-150 W. Samostatný solární článek tak nemá valného využití, jeho výstupní napětí i výkon je pro většinu aplikací příliš malý. Za účelem vyššího napětí nebo proudu se proto články spojují sériově nebo paralelně a vznikají tak fotovoltaické panely, ze kterých se dále sestavují fotovoltaická pole [5].



**Obrázek 3** Spojování solárních článků [5]

## 2.3 Piezoelektricitá

Označení piezoelektricitá vzniklo spojením řeckého slova „piezo“, v překladu tlačit a anglického „electricity“ [2]. Piezoelektrické generátory pracují na principu piezoelektrického jevu, jehož přímou interpretaci objevili francouzští fyzici - bratři Pierre Curie a Jacques Curie v roce 1880. Poprvé byl pozorován na krystalech turmalinu a následně i krystalech křemene. Společně zjistili, že při deformaci krystalů určitých materiálů dochází na povrchu krystalu ke vzniku elektrického náboje [6]. Zjednodušeně řečeno dochází při vzniku piezoelektrického jevu k přetváření mechanického namáhání na elektrické napětí. Jako zdroj mechanického namáhání si můžeme představit tlak nebo vibrace, které způsobují deformaci piezoelektrických materiálů.



**Obrázek 4** Deformace krystalu (převzato a upraveno z [6])

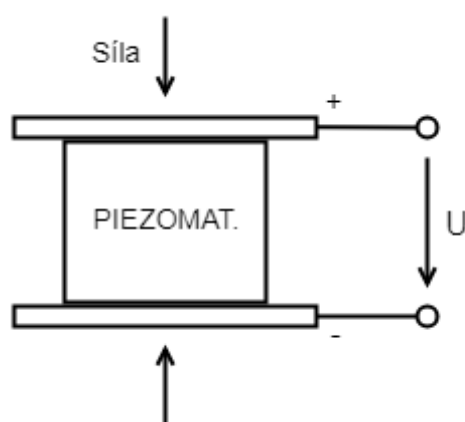
### Piezoelektrické materiály

Jeden z používaných přírodních piezoelektrických materiálů je například monokrystalický křemen. Syntetickým a také nejčastěji používaným materiálem je keramika vykazující piezoelektrické vlastnosti. Valná většina dnes používaných piezoelektrických systémů je založena na keramice z olovo-zirkonátu-titanátu (PZT). Keramika naneštěstí není ve své podstatě piezoelektrická, dokud není upravena polarizací elektrickým polem. Při polarizaci je materiál vystaven stejnosměrnému elektrickému

napětí, což v materiálu zanechá zbytkovou polarizaci [7]. Tento proces je podobný remanentní magnetizaci, kdy kovový materiál po vystavení elektro-magnetickému poli vykazuje magnetické vlastnosti i po jeho uvolnění z elektro-magnetického pole.

### Piezoelektrický jev

V zásadě existují dva typy piezoelektrického jevu – přímý a nepřímý. Pro přímý piezoelektrický jev platí, že jakmile na objekt působí tlak, vzniká na stlačené straně pozitivní náboj a naopak na expandované straně vzniká záporný náboj. Díky tomu po uvolnění tlaku začne materiálem procházet elektrický náboj. Při nepřímém piezoelektrickém jevu naopak vystavujeme piezoelektrický materiál elektrickému poli. Díky tomu dochází k deformaci piezoelektrického prvku [2].



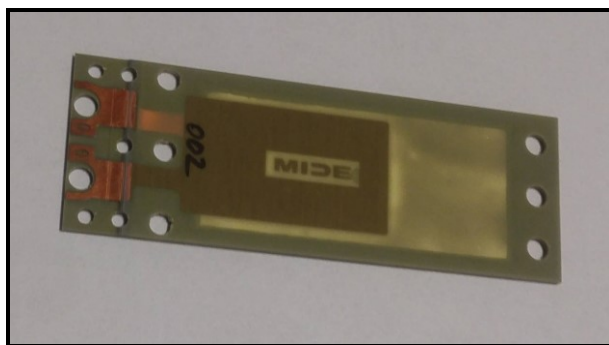
**Obrázek 5** Piezoelektrický princip (převzato a upraveno z [8])

### Curieova teplota

V určitých aplikacích s vysokou okolní teplotou může hrát roli Curieova teplota. Ta je popsána jako bod, při kterém dochází k zarovnání krystalické mřížky materiálu. To zapříčiní ztrátu některých vlastností feromagnetických a určitých piezoelektrických materiálů. Pro feromagnetické materiály to znamená, že přicházejí o svou schopnost vyzařovat remanentní magnetické pole. Podobný princip platí i pro polarizovanou piezokeramiku, která po překročení Curieho teploty ztrácí své piezoelektrické atributy. Po vychladnutí materiálu jsou jejich remanentní vlastnosti obnoveny [9]. V rámci této práce Curieho teplota nemá valný význam, protože předpokládám práci a měření při nízkých, typicky pokojových teplotách.

### Piezoaktuátory

Piezoaktuátory mají široké spektrum využití. Patří mezi nejperspektivnější prvky pro sběr energie z okolí, protože zdroj energie v podobě vibrací, se nachází všude kolem nás. Produkují je například projíždějící automobily, stroje použité ve výrobních halách, chodci a dokonce i samotná planeta Země v podobě pohybu tektonických desek.



**Obrázek 6** Piezoelement PPA-4011

Výstupní výkon jednoho prvku je velmi malý, v řádu mW až  $\mu$ W, záleží na velikosti a tloušťce vrstvy PZT [2]. Zdá se, že to není mnoho, ale stačí to například k pohánění samo-natahovacích hodinek nebo módních doplňků v podobě tak zvané nositelné elektroniky. Pro zvýšení produkovaného výkonu je možné zapojit více prvků najednou a vytvořit tak velkoplošnou podložku. Příkladem možné aplikace mohou být energii generující chodníky. Piezoelektrické podložky instalované pod chodník poté mohou sbírat energii z chůze a ta může být ukládána pro další využití. Podobný proces je možné využít na dálnici. V takovém případě by bylo množství generované energie daleko větší [8].

### **Opačné použití piezoaktuátorů**

Jak už jsem nastínil, opačným využitím piezoelektrických materiálů je, že při stimulaci elektrickým polem mohou měnit svůj tvar., respektive deformovat se. Deformace může probíhat cyklicky s určitou frekvencí, která je dána frekvencí střídavého napětí přivedeného na kontakty piezoelementu. Nevýhodou piezokeramiky a monolitických krystalů je ovšem nízká ohebnost či plasticita. V tomto ohledu jsou tedy výhodnější tak zvané elektroaktivní polymery, které jsou daleko ohebnější. Díky tomu mohou být využity například v robotice k vytvoření umělého svalstva [6].

## **2.4 Termoelektricitá**

Pro termočlánky platí, že termoelektrický člen vzniká na základě dvou rozdílných materiálů, které jsou na jednom konci spojeny. Spojení může být provedeno například svařem. Při vystavení konců rozdílným teplotám dojde v důsledku odlišných termodynamických vlastností obou materiálů ke vzniku termoelektrického napětí, které je přímo úměrné rozdílu teplot obou konců.

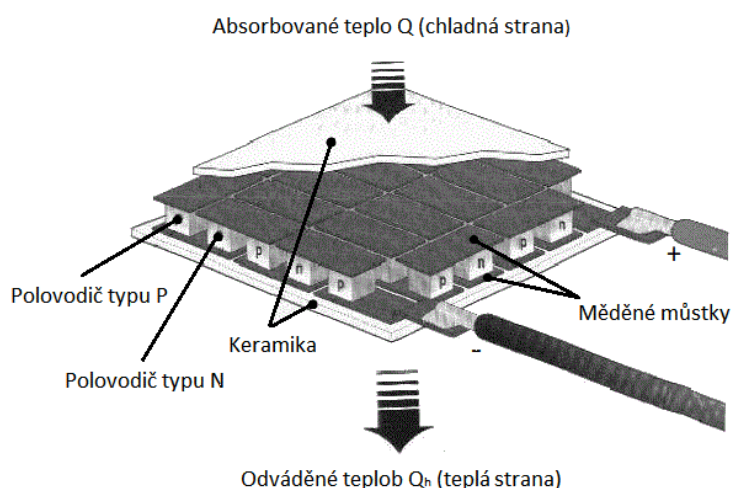
### **Peltierův – Seebeckův efekt**

Termoelektrické generátory pracují na principu Peltierova efektu, který je inverzní k Seebeckovu efektu. Tyto jevy jsou spolu úzce spjatý. Seebeckův efekt nám říká, že jsou-li

spojeny dva vodiče různých kovových materiálů do uzavřeného obvodu a mají-li od sebe různou teplotu, začne obvodem protékat elektrický proud. Inverzně k tomu pak Peltierův efekt znamená, že protéká-li elektrický proud Seebeckovým obvodem, vzniká teplotní rozdíl mezi oběma vodiči [10].

### Peltierův článek

Peltierův článek má dvě strany, z nichž se jedna zahřívá (odvádí teplo) a druhá chladí (absorbuje teplo). Směr protékajícího proudu nám dále určuje, zda se bude daný spoj, respektive strana, ohřívat či ochlazovat. Pokud teče proud stejným směrem, jako při ohřátí daného spoje při Seebeckově efektu, pak se daný spoj ochlazuje. Při opačném směru proudu se daný spoj ohřívá.



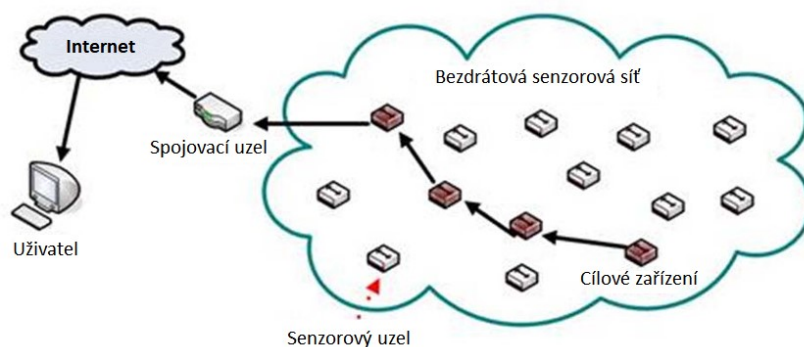
**Obrázek 7** Vnitřní struktura Peltierova článku (převzato a upraveno z [10])

Peltierův článek se tedy skládá ze dvou keramických desek, mezi kterými se nachází tak zvané sloupky, které jsou tvořeny polovodiči typu P a N. Tyto sloupky jsou vždy po párech sériově spojeny měděnými spojovacími můstky. Takové Peltierovy články se dále zapojují do série do tak zvaných Peltierových termobaterií tak, aby po připojení ke zdroji elektrické energie tvořily se všemi ostatními páry uzavřený obvod.

Mezi výhody patří malé rozměry, prakticky okamžitý efekt ochlazování/zahřívání, vysoký rozsah teplot (podle typu článku až  $-30^{\circ}\text{C}$ ), snadná regulace výkonu, tichý provoz a dlouhá životnost. Nevýhodou je vysoká spotřeba, náchylnost k přehřátí, poměrně vysoká cena v případě potřeby vysokého chladicího výkonu a nízká účinnost. Výhody však převládají nad nevýhodami a jsou hojně využívány v mnoha aplikacích, jako jsou například přenosné chladicí boxy, chladiče přenosných kontejnerů pro farmaceutická a kosmetická zařízení, termostaty či klimatizační jednotky [10].

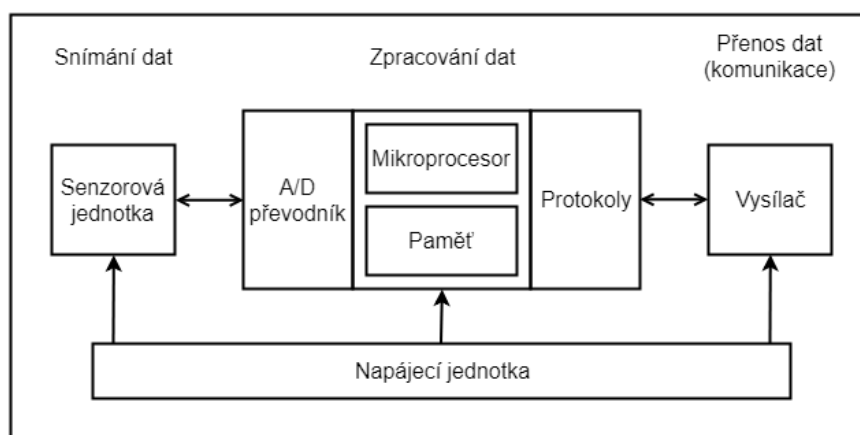
### 3 Aplikace v senzorice

Neustálé snižování velikosti, spotřeby a cen senzorů má za následek jejich rozšíření do mnoha průmyslových odvětví. Mezi nejzajímavější aplikace patří senzorové sítě. Narážíme ovšem na problém spočívající v neefektivitě a velikosti napájecích zdrojů potřebných pro vysoce integrované senzorové sítě. Základní myšlenkou je bezdrátová senzorová síť, která shlukuje více snímačů do jednoho měřicího řetězce s bezdrátovou výměnou informací [1].



**Obrázek 8** Obecný model bezdrátové senzorové sítě (převzato a upraveno z [11])

Z obrázku 8 vyplývá obecný princip bezdrátové senzorové sítě. Pod pojmem senzorový uzel si můžeme představit měřící zařízení, které vyhodnocuje a pomocí bezdrátové komunikace odesílá naměřená data do brány v podobě spojovacího uzlu, poskytující rozhraní mezi senzorovou sítí a uživatelem. Brána může být připojena na lokální nebo veřejnou síť a dále odesílat informace na cílové zařízení. Monitoring tak může probíhat i na velmi velké vzdálenosti prakticky v reálném čase.



**Obrázek 9** Struktura senzorového uzlu (převzato a upraveno z [12])

Základní struktura senzorového uzlu je znázorněna na obrázku 9. Jeho hardware ve většině případů obsahuje čidlo snímající vyhodnocovanou veličinu, mikrokontrolér s A/D převodníky pro zpracování veličiny, paměť umožňující zálohu dat a nízkoenergetický

vysílač sloužící k bezdrátové komunikaci a odesílání naměřených údajů. O napájení celého uzlu se ve většině případů stará akumulátor, který není považován jako ideální řešení pro dlouhodobý provoz bezdrátové senzorové sítě. Druhou možností je použití superkapacitoru, který je dobíjen obvodem zpracovávajícím sbíranou energii. Pro takový obvod je vhodné použít mikrokontrolér, který je naprogramován tak, aby docházelo ke spouštění jeho funkce (odečtení hodnot ze snímačů a odeslání informací na určenou lokaci) v pravidelném intervalu. Pro úsporu energie je obvod s mikrokontrolérem mezi pracovními cykly uveden do režimu spánku.

### **Elektřinu produkující pneumatiky**

Již v dnešní době existuje mnoho firem produkujících elektricky poháněné automobily. Výrobci se ovšem potýkají s problémem napájení elektrických pohonů, a tím souvisejícím dojezdem elektrických automobilů. Zákazníci požadují co největší výkon při co největší dojezdové vzdálenosti. V praxi ovšem vyšší výkon znamená také vyšší odběr pohonu a tím pádem i nižší dojezd.

Doplnění elektrické energie není tak jednoduché jako načerpat benzín. Pokud se tedy uživatel nalézá daleko od domova, je nucen počítat s možností vybití baterie a vyskytovat se tak v lokalitě, která nabízí možnost nabíjení elektromobilů. Síť nabíječek však stále není dostatečně rozvinutá.



**Obrázek 10** *Koncept pneumatiky BH-03*[15]

Problémem se zabývá například firma Goodyear. Na autosalonu Geneva Motor Show 2015, představila společnost The Goodyear Tire & Rubber Company koncept pneumatiky, která by mohla změnit význam pneumatik u budoucích, převážně elektrických, vozů. Pneumatika představená pod kódovým označením BH03 nabízí možnost nabíjení baterií a napájení veškerých palubních zařízení elektrických automobilů. To zajišťují speciální



termoelektrické a piezoelektrické materiály. Jak už název napovídá, termoelektrický materiál převádí teplo generované válením pneumatiky na elektrickou energii, kdežto piezoelektrický materiál transformuje na elektrickou energii tlak vznikající v důsledku deformace pneumatiky. Prakticky se tak jedná o dva druhy generátorů – termoelektrický a piezoelektrický v jednom zařízení, které přispějí v napájení elektromobilů, čímž zvýší dojezdovou vzdálenost a částečně eliminují požadavky na velikost baterií [13][14].

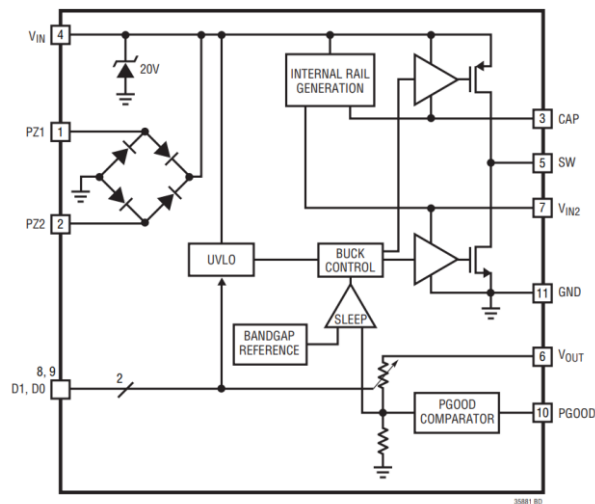
## 4 Obvody typu energy harvesting

Okolní energii produkovanou pomocí alternativních zdrojů napájení není možné přímo použít pro nabíjení baterie nebo superkapacitoru. Je zapotřebí ji vhodným způsobem zpracovat. K tomu slouží integrované obvody řídící napájení. Dle použitého typu akumulátoru existují dvě možnosti napájení připojených obvodů. Jednou z možností je použití jako zdroje elektrické energie baterii. V takovém případě je baterie dobíjena pomocí usměrněného napětí, které je produkováno obvodem zpracovávajícím energii z alternativního zdroje a dochází k prodloužení délky činnosti obvodu. Druhou možností je použití superkapacitoru pro akumulaci produkované energie. V tom případě není možné napájený obvod udržet neustále ve funkci. Je tak vhodné uvádět napájený obvod do funkce cyklicky, tedy v určitých intervalech. Při provedení požadované funkce dojde k uvolnění energie uložené v kapacitoru a je použita pro napájení připojených obvodů. Mezi cykly musí být obvody uvedeny do režimu snížené spotřeby, jinak by nedošlo ke znovu nabití kapacitoru.

Vzhledem k použitému zdroji alternativní energie je nutné vybrat i vhodný obvod schopný zpracovat energii zdrojem produkovanou. V zásadě tak vybíráme obvod podle toho, na jakém místě bude umístěn a v jakých podmínkách bude pracovat. Některé obvody umožňují zpracovávat energii produkovanou více typy alternativních zdrojů. Pro potřeby této práce byly vybrány obvody LTC 3588-1 a LTC 3108.

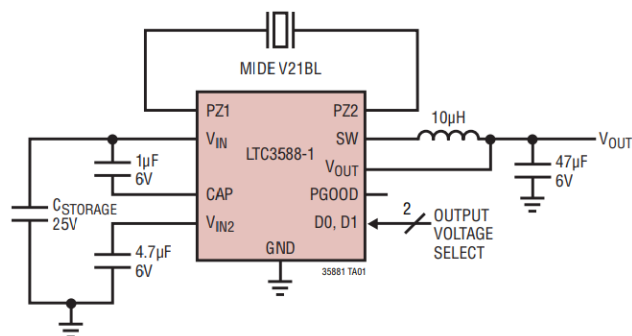
### LTC 3588-1

V rámci zadaných zdrojů alternativní energie je potřeba zpracovat energii termoelektrickou, fotovoltaickou a piezoelektrickou. Obvod LTC 3588-1 od firmy Linear Technology Corporation je oficiálně označován jako velmi účinný energy harvesting obvod pro nízkoenergetické zdroje. V popisu obvodu, vyskytujícím se v datasheetu [16], výrobce uvádí, že je obvod schopen zpracovat energii z piezoelektrických, solárních a magnetických alternativních zdrojů, přičemž dále v dokumentu se nalézá i zapojení s termoelektrickým generátorem. Není ovšem vhodné použít tento obvod primárně pro solární a Peltierův článek z důvodu stejnosměrné charakteristiky jejich výstupního napětí, zatímco výstupní charakteristika piezoelektrického elementu se z praktického hlediska daleko více podobá střídavé charakteristice, kdy se na jeho výstupu může objevit také napětí o záporné polaritě.



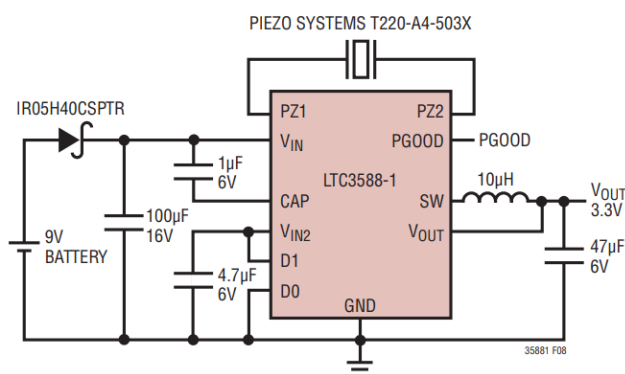
**Obrázek 11** Vnitřní struktura LTC 3588-1 [16]

Z toho důvodu na svém vstupu LTC 3588-1 ukrývá můstkový usměrňovač. Jeho vstupy jsou přímo vyvedeny jako piny *PZ1* a *PZ2* pro připojení zpracovávané energie v podobě střídavého napětí nebo proudu. Usměrněný výstup se poté akumuluje do externího kapacitoru nebo superkapacitoru připojeného na pin  $V_{IN}$ . Pomocí Zenerovy diody připojené v závěrném směru je vstup chráněn proti přepětí. Paralelně je k  $V_{IN}$  dále připojen UVLO blok (undervoltage lockout), který monitoruje napětí na externím akumulacním kondenzátoru a na základě velikosti napětí spouští nebo vypíná funkci snižujícího DC/DC měniče (buck converter), respektive řídí frekvenci spínání PMOS a NMOS tranzistorů. Jeho výstup je vyveden na pin *SW*, kde může být připojena externí filtrace napětí. Výstupní napětí je volitelné ve čtyřech úrovních – 1,8 V; 2,5 V; 3,3 V a 3,6 V pomocí kombinace logických úrovní na pinech *D0* a *D1*. Pro probouzení externích zařízení slouží pin *PGOOD*.



**Obrázek 12** Základní zapojení s piezoelektrickým aktuátorem [16]

Protože je piezoelektrický element schopen produkovat velmi nízký proud, typicky v rámci jednotek, maximálně desítek mikroampérů, je zapotřebí minimalizovat spotřebu obvodu. Proto, pokud není zdroj zatížen, může být obvod uveden do režimu spánku, kdy je odpojen výstup a dochází pouze k akumulaci energie do externího kondenzátoru. Pokud se na něm nasbírání dostatečné množství energie (92% cílové hodnoty), blok UVLO spustí funkci měniče a kondenzátor je použit jako zdroj energie pro napájené zařízení. Pin *PGOOD* je uveden do stavu log. 1 a informuje tak napájené zařízení, že může být uvedeno do funkce. Jakmile napětí na kondenzátoru poklesne pod určitou mez, výstup je blokem UVLO znovu vypnut, obvod je znovu uveden do režimu spánku a *PGOOD* je uveden do stavu log. 0. Napájené zařízení je tak informováno, že pro jeho funkci není naakumulováno dostatečné množství energie a může tak být uvedeno do režimu snížené spotřeby. Pokud ze zdroje není odebírán proud, obvod se pro minimalizaci spotřeby do režimu spánku uvádí automaticky a akumulací kondenzátor se tak jeho vlastní spotřebou prakticky nevybíjí.



**Obrázek 13** Zapojení se záložní baterií [16]

V případě potřeby zajištění trvalého napájení zařízení, například při přerušení vibrací potřebných k funkci piezoelektrického prvku, může být k akumulacímu kondenzátoru paralelně připojena záložní baterie s blokovací diodou v závěrném směru, která chrání baterii před zpětným proudem. Výrobce uvádí, že je možné použít libovolnou baterii o libovolném počtu článků, s jediným omezením na maximální napětí baterie, které činí 18 V. V tomto zapojení tak nezískáme nezávislost na baterii, ale můžeme jejím dobíjením několikanásobně prodloužit funkční dobu zařízení, než bude potřeba baterii vyměnit. Pokud v zapojení není přítomen piezoelektrický prvek, obvod může sloužit jako samostatný snižující DC/DC měnič, usměrňovač není používán a blokovací dioda tak není zapotřebí.

### Základní vlastnosti LTC 3588-1:

- spotřeba bez zatížení, max. 950 nA,
- spotřeba v UVLO módu, max. 450 nA,
- vstupní napětí 2,7 V – 20 V,
- integrovaný nízko-ztrátový můstkový usměrňovač,
- výstupní proud až 100 mA,
- volitelné výstupní napětí 1,8 V; 2,5 V; 3,3 V a 3,6 V.

LTC 3588-1 nalézá uplatnění v mnoha aplikacích, jako jsou:

- sběr piezoelektrické energie,
- sběr elektro – mechanické energie,
- bezdrátové HVAC snímače,
- snímače tlaku v pneumatikách,
- náhrada baterií průmyslových senzorů,

### LTC 3108

Na rozdíl od LTC 3588-1 je energy harvesting obvod LTC 3108 uzpůsoben pro sběr energie ze zdrojů produkujících stejnosměrné napětí nebo proud. Výrobce je označován jako zvyšující měnič ultra nízkého napětí a ovladač napájení. Prakticky se jedná o vysoce integrovaný DC/DC měnič, který je vhodný ke zpracování energie z nízkonapěťových zdrojů, především termoelektrických generátorů jako je Peltierův článek a ze solárních článků. Uvnitř datového listu ovšem můžeme nalézt také zapojení pro energy harvesting ze střídavých zdrojů energie, jakou je právě piezoelektrický element. Pro výše uvedené důvody není ovšem vhodné obvod použít primárně pro střídavé zdroje.

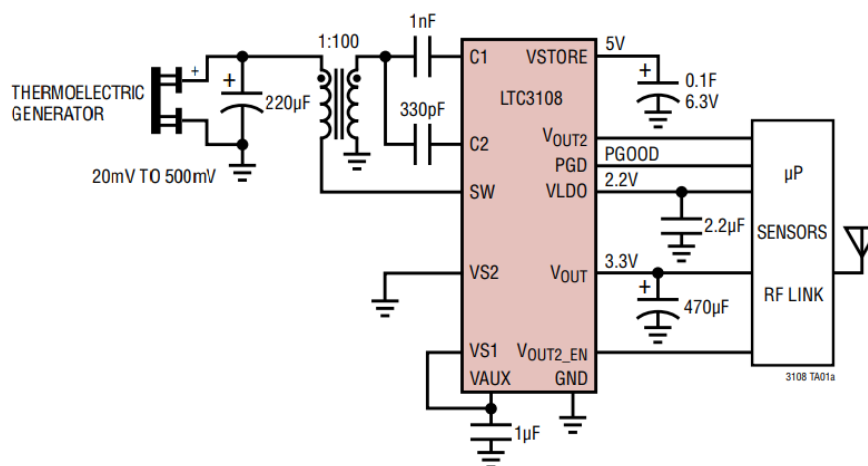
Celý obvod je navrhnut, aby bylo k napájení připojeného zařízení, respektive sběru energie, možné použít velice nízké napětí. Výrobce udává, že je obvod schopen pracovat s napětím od 20 mV. Samotný integrovaný obvod ovšem není schopen přímo pracovat s tak nízkým napětím a musí být proto externě upraveno pomocí malého zvyšujícího transformátoru připojeného před zdroj energie. Napětí zdroje se transformuje dle poměru počtu závitů cívek transformátoru a udává, jak s malým napětím může IO pracovat. Pro použití zdroje energie, který produkuje 20 mV je zapotřebí mu předřadit transformátor se zesílením 1:100. Pro vyšší napětí můžeme použít transformátory o zesílení 1:20 a 1:50, přičemž výrobce v dokumentaci doporučuje transformátory od firem Coilcraft a Würth.


$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_{\text{sek}} \cdot C_2}} \text{ (Hz)} \quad (4.1)$$

Mezi sekundární vinutí a pin  $C1$  je připojen takzvaný kondenzátor nábojové pumpy a má vliv na vstupní odpor a maximální proudovou zatížitelnost měniče. Pro zpracování nejnižších napětí je typická minimální hodnota kapacitoru  $C_1$  je 1 nF pro transformátor s poměrem vinutí 1:100. Pro vyšší napětí a nižší poměry vinutí může být pro zajištění vyššího proudového zatížení hodnota kapacitoru  $C_1$  zvýšena. Příliš vysoká hodnota ovšem snižuje produkovaný výkon. Uvnitř LTC 3108 je vstup dále usměrněn integrovaným usměrňovačem, který nabíjí kapacitor umístěný na pinu  $VAUX$ .

30

Obvod LTC 3108 má tři výstupy zpracované energie. Primárně se pro výstupní napětí používá brána  $V_{OUT}$ , napájená kondenzátorem na pinu  $VSTORE$ . Velikost výstupního napětí je určena uživatelem dle kombinace logických úrovní na pinech  $VS1$  a  $VS2$ . Výstup je regulovaný a v případě, že napětí klesne pod nastavenou úroveň, je za podmínky napětí na pinu  $VAUX > 2,5$  V spuštěn dobíjecí proud a hladina napětí je dorovnána. Typicky se na  $V_{OUT}$  připojuje externí kapacitor pro uchování sbírané energie. Druhou možností výstupu je brána  $V_{OUT2}$ , jejíž funkce může být zapnuta nebo vypnuta pinem  $V_{OUT2\_EN}$ , například pomocí mikroprocesoru a ovládat tak napájení externích periférií, které samostatně neumožňují uvedení do režimu snížené spotřeby. Pro napájení nízko-příkonových integrovaných obvodů a mikroprocesorů slouží výstup  $VLDO$ , produkující regulované napětí o hodnotě 2,2 V s minimálním odběrem 4 mA. Aby byla zaručena stabilita integrovaných obvodů, musí k němu být připojen vyrovnávací kondenzátor o minimální hodnotě 2,2  $\mu F$ .



K dodatečnému uchování energie může být na pin *VSTORE* připojen vysokokapacitní kondenzátor, případně dobíjecí baterie. Nabíjení těchto prvků je umožněno pouze v případě, že dojde k plnému nabití kapacitoru na výstupu  $V_{OUT}$ . K odběru energie z kapacity *VSTORE* dochází při přerušení dodávky energie z alternativního zdroje,

respektive v případě vybití kapacitoru  $V_{OUT}$ , kdy zdroj napájení není schopen dodat dostatečné množství energie pro zařízení na výstupech  $V_{OUT}$ ,  $V_{OUT2}$  a  $VLDO$  [17].

Základní vlastnosti LTC 3108:

- vstupní napětí od 20 mV,
- volitelné výstupní napětí 2,35 V; 3,3 V; 4,1 V a 5 V
- LDO 2,2 V při 3 mA
- Ovladatelný výstup nahrazující úsporné funkce externích obvodů

LTC 3108 nalézá uplatnění v mnoha aplikacích, jako jsou:

- Bezdrátové senzory
- HVAC systémy
- Průmyslová bezdrátová sensorika
- Automatizovaná měření
- Automatizace budov
- Predikce potřeby údržby



## 5 Měření charakteristik zdrojů energie

Ve většině případů výrobci testují své produkty a následně uvádějí tyto parametry v rámci tzv. datasheetů, tedy produktových tabulek. Z praktického hlediska ovšem není vždy možné dosáhnout stejných vstupních podmínek, jaké pro své produkty definoval výrobce. Je tedy vhodné zjistit pracovní parametry na základě dostupných či dokonce žádaných pracovních podmínek.

V případě zařízení použitých v této práci je zapotřebí změření charakteristik solárních článků, jejichž parametry nejsou známy a ani dohledatelné, vzhledem k chybějícím modelovým označením. Hlavním cílem je tak určení jejich parametrů vycházejících z měření maximálního bodu výkonu MPP.

V případě termoelektrického generátoru výrobce uvádí parametry pro teplotní gradient  $70^{\circ}\text{C}$ , přičemž je uvedena teplota studené strany činící  $30^{\circ}\text{C}$  a teplota teplé strany  $100^{\circ}\text{C}$ . Takových podmínek ovšem nejsme z dlouhodobého hlediska schopni dosáhnout. Hlavním cílem je tak určení parametrů při nižších teplotních gradientech.

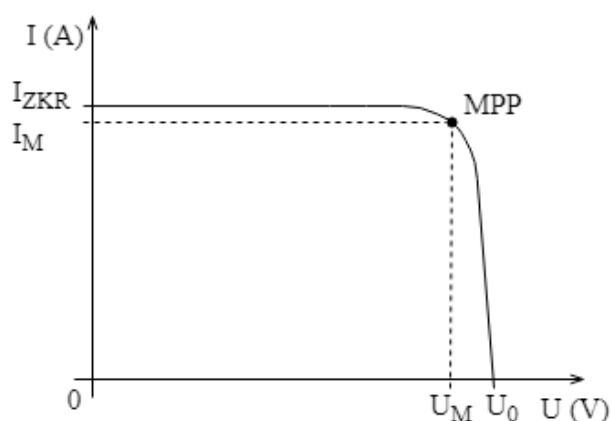
Při měření piezoaktuátoru je hlavním cílem zjištění produkovaného výkonu v závislosti na velikosti, frekvenci deformace a hmotné zátěži. V případě piezoaktuátoru výrobce uvádí určité parametry pro energy harvesting v datovém listu, ovšem nejsou zcela porovnatelné z důvodu lišících se vstupních podmínek.

### 5.1 Solární články

Hlavní parametry solárního článku vychází z jeho volt-ampérové charakteristiky na obrázku 16. Název nám napovídá, že se jedná o závislost výstupního proudu na výstupním napětí. Každý bod charakteristiky odpovídá jiné velikosti odporové zátěže, přičemž bod o nulové zátěži odpovídá zkratovému proudu  $I_{\text{ZKR}}$ . Na druhou stranu bod o maximální zátěži, tedy nulovém protékajícím proudu, odpovídá napětí naprázdno  $U_0$ . Zkratový proud je možné zjistit pouze měřidly o velice nízkém vnitřním odporu [18].

Při měření volt-ampérové charakteristiky solárních článků je nutné zajistit vhodné osvětlení a znát intenzitu zvoleného osvětlení. Intenzitu osvětlení je možné měřit tak zvaným luxmetrem. Senzor luxmetru se umístí do stejné vzdálenosti  $l$  od zdroje osvětlení jako solární článek tak, aby nedošlo k zastínění článku. Jako nejlepší světelný zdroj se jeví sluneční světlo, které zahrnuje kompletní barevné spektrum. Není ovšem vhodné z důvodu komplikované, ba až nemožné regulace jeho intenzity. Na návrh vedoucího práce je pro měření použita výkonová LED dioda, která je umístěná v určité vzdálenosti  $l$  od solárního

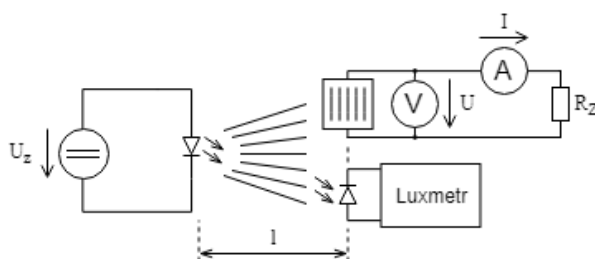
článku. LED dioda je připojena na laboratorní zdroj a regulaci intenzity osvětlení docílíme změnou napětí na zdroji. V případě příliš nízkého příkonu LED diody nebo jejím úplném odpojení od zdroje napájení, není osvit solárního článku nulový, ale odpovídá intenzitě okolního světla. Z důvodu omezení chyby probíhá měření při vypnutém osvětlení a umístění měřicího řetězce do kartonové krabice.



**Obrázek 16** *A-V charakteristika solárního článku (převzato a upraveno z [19])*

Měření intenzity světla zajistí digitální luxmetr EM2243. Zařízení je vhodné pro měření viditelného světla z většiny typů zdrojů, jako jsou žárovky, výbojky a sluneční světlo. Intenzitu osvětlení měří v jednotce lux, který představuje světelný tok ze zdroje o 1 cd dopadající na plochu  $1 \text{ m}^2$  ze vzdálenosti 1 m. Je schopen měřit v rozsahu  $0 \div 99999 \text{ lux}$ , s přesností  $\pm 3 \%$  při použití standardní žárovky [20].

K měření byly použity fotovoltaické články (malý a velký) na obrázku 2, poskytnuty vedoucím práce. Jejich přesné parametry nejsou známy a dále jsou výše popsáným způsobem měření určeny a vykresleny v podobě jejich ampér-voltové charakteristiky.

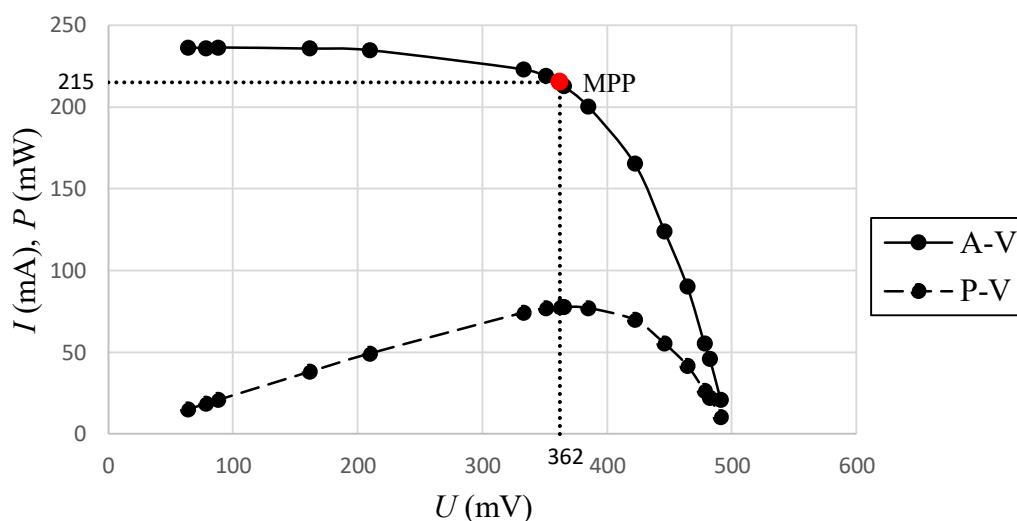


**Obrázek 17** *Měřicí schéma A-V a P-V charakteristik fotočlánku*

Pro měření jsem zvolil konstantní intenzitu osvětlení článku 100 tisíc luxů. Tato hodnota odpovídá maximální intenzitě měřitelné pomocí použitého luxmetru, přičemž zvolená vzdálenost mezi LED diodou a luxmetrem činí přibližně 8 cm. Jako zátěž jsou

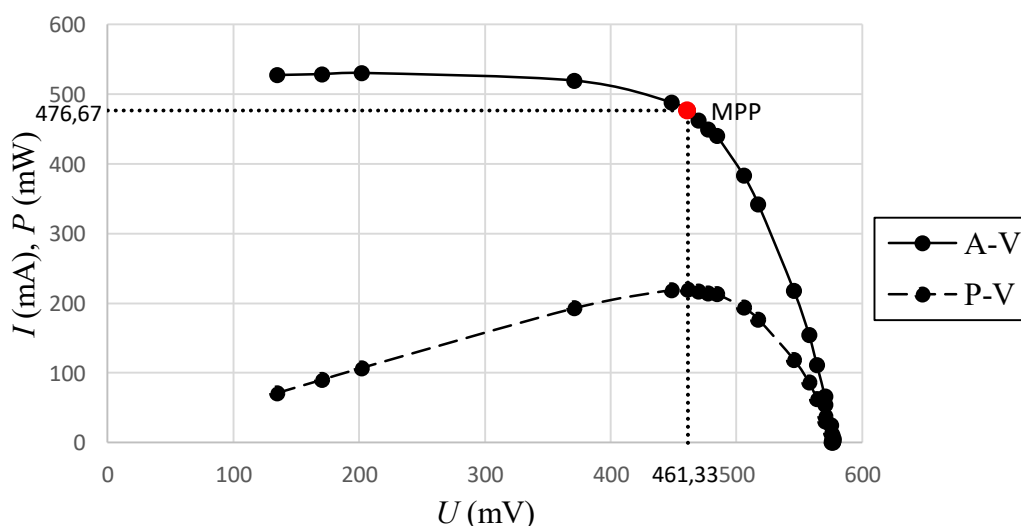
použity rezistory o různém odporu. Jejich hodnoty můžeme nalézt v tabulce naměřených hodnot v přílohách A a B. Hodnoty použitých rezistorů se mírně liší v závislosti na parametrech článků.

Měření každého článku je provedeno třikrát a následně jsou hodnoty průměrovány pro omezení chyby měření. Po vykreslení charakteristiky je možné zjistit ideální pracovní bod MPP solárního článku, tedy bod při jaké odporové zátěži produkuje maximální výkon.



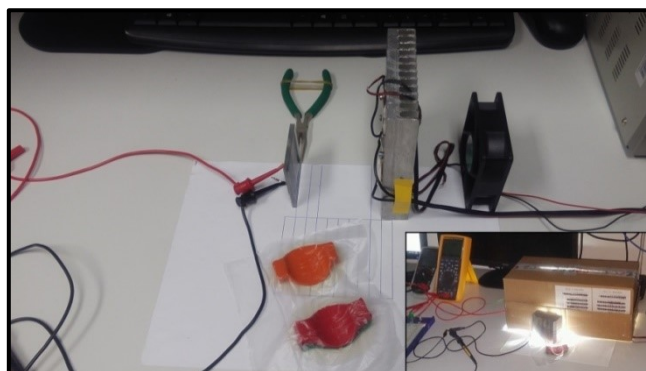
**Obrázek 18** MPP malého solárního článku

Ze změřené křivky na obrázku 18 a v přílohy A vyplývá, že MPP malého solárního článku odpovídá odporové zátěži  $1,35 \Omega$  při výkonu  $77,83 \text{ mW}$ .



**Obrázek 19** MPP velkého solárního článku

Analogicky z křivky na obrázku 19 a přílohy B vyplývá, že MPP velkého solárního článku odpovídá odporové zátěži  $0,65 \Omega$  při výkonu  $219,83 \text{ mW}$ .



**Obrázek 20** Měřicí řetězec pro testování solárních článků

Díky těmto měřením jsem schopen zjistit činitel plnění (fill factor) nebo-li parametr vypovídající o kvalitě solárního článku. Z pohledu A-V charakteristiky představuje poměr plochy určené souřadnicemi MPP vzhledem k ploše odpovídající násobku souřadnic  $I_{ZKR}$  a  $U_0$ . Zjednodušeně se jedná o poměr mezi výkonem dostupným v bodě maximálního výkonu a násobkem  $I_{ZKR}$  a  $U_0$  [18].

$$FF_{M\check{c}} = \frac{P_{MPP1}}{I_{ZKR} \cdot U_0} = \frac{0,2150 \cdot 0,3620}{0,2363 \cdot 0,4980} = 0,6613 \cdot 100 = 66,13 \% \quad (5.1)$$

$$FF_{V\check{c}} = \frac{P_{MPP2}}{I_{ZKR} \cdot U_0} = \frac{0,4767 \cdot 0,4613}{0,5277 \cdot 0,5757} = 0,7239 \cdot 100 = 72,39 \% \quad (5.2)$$

kde:  $FF_{M\check{c}}$  – faktor plnění malého článku (%),  $FF_{V\check{c}}$  – faktor plnění velkého článku (%),  $P_{MPP}$  - výkon v bodě maximálního výkonu (W),  $I_{ZKR}$ - zkratový proud (A),  $U_0$  – napětí naprázdno (V).

Účinnost obou článků nejsem schopen, vzhledem ke vstupním parametrům, přesně vypočítat. Typický vzorec pro výpočet účinnosti solárního článku je poměrem mezi výstupním výkonem v bodě MPP a výkonem dopadajícího záření [18].

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{P_{IN}} = \frac{P_{MPP}}{P_{rad} \cdot S} \cdot 100 (\%) \quad (5.3)$$

kde:  $\eta$  - účinnost solárního článku (%),  $P_{IN}$  - vstupní zářivý výkon (W),  $P_{rad}$  - vstupní intenzita záření (typicky  $1000 \text{ W/m}^2$ ),  $S$  - plocha článku ( $\text{m}^2$ ).

Měření ovšem neprobíhalo za standardizovaných podmínek při intenzitě záření  $1000 \text{ W/m}^2$  a spektru AM1.5, ale jednoduše při intenzitě osvětlení 100 klx. Jednoduchý převod mezi těmito jednotkami není možný, protože při přepočtu je zapotřebí znát

spektrální vlastnosti použitého osvětlení. Proto jsem se rozhodl provést odhad účinnosti za použití intenzity záření odpovídající 1000 W/m<sup>2</sup> [18].

$$\eta_{M\check{C}1} = \frac{P_{MPP1}}{P_{rad} \cdot S_{M\check{C}}} = \frac{77,83 \cdot 10^{-3}}{1000 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3}} \cdot 100 = 6,23 \% \quad (5.4)$$

$$\eta_{V\check{C}1} = \frac{P_{MPP2}}{P_{rad} \cdot S_{V\check{C}}} = \frac{219,83 \cdot 10^{-3}}{1000 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}} \cdot 100 = 8,79 \% \quad (5.5)$$

kde:  $\eta_{M\check{C}1}$  – účinnost malého solárního článku (%),  $\eta_{V\check{C}1}$  – účinnost velkého solárního článku (%),  $P_{MPP1}$  – maximální bod výkonu malého solárního článku (W),  $P_{MPP2}$  – maximální bod výkonu velkého solárního článku (W),  $S_{M\check{C}}$  – plocha malého solárního článku (m<sup>2</sup>),  $S_{V\check{C}}$  – plocha velkého solárního článku (m<sup>2</sup>).

Pro přesnější výpočet účinnosti, za použití luxů jako vstupní jednotky, je možné vypočítat vstupní výkon osvětlení jako poměr intenzity osvětlení na ploše vzhledem ke světelné účinnosti použitého zdroje světla pomocí rovnice (5.6) [21].

$$P = \frac{E_V \cdot S}{\eta_{SV}} \quad (W) \quad (5.6)$$

kde:  $P$  - výkon dopadajícího osvětlení (W),  $E_V$  - intenzita osvětlení (lx),  $S$  - plocha článku (m<sup>2</sup>),  $\eta_{SV}$  - světelná účinnost (lm/W).

Platnost uvedeného vztahu mohu prokázat kontrolou pomocí dosazení jednotek. Pro intenzitu osvětlení platí, že 1 lx odpovídá světelnému toku 1 lm dopadajícím na plochu 1 m<sup>2</sup>:

$$P = \frac{(lx) \cdot (m^2)}{\frac{(lm)}{(W)}} = \frac{\frac{(lm)}{(m^2)} \cdot (m^2) \cdot (W)}{(lm)} = \frac{(lm)}{(lm)} \cdot (W) \quad (5.7)$$

získáme:

$$(P) = W \quad (5.8)$$

V rovnici (5.6), figuruje neznámá v podobě světelné účinnosti  $\eta$  použitého osvětlení, která představuje poměr mezi světelným tokem použitého osvětlení vzhledem k jeho příkonu. Parametry použité LED diody nejsou známy a není na ní uvedeno žádné označení.

Po provedení obecného průzkumu jsem došel k závěru, že se zřejmě jedná o 50 W COB (Chip On Board) LED diodu s maximálním proudem v propustném směru  $I_F = 1500$  mA. Tato domněnka byla dále podpořena připojením LED diody ke zdroji, přičemž bez poškození zvládla odebírat proud okolo 1300 mA (maximální proud v propustném směru pro 40 W LED COB diody odpovídá  $I_F = 1200$  mA).

Na stránkách prodejce Hadex, spol. s.r.o. jsem našel COB LED diodu předpokládaných parametrů:

**Tabulka 1** Parametry COB LED diody Epistar [22]

Výrobce	Epistar Corporation	
Výstupní výkon (W)	$P$	50
Vstupní napětí (V)	$U$	30 – 32
Proud v propustném směru (A)	$I_F$	1,5
Teplota chromatičnosti (K)	$T_C$	6000
Světelný tok (lm)	$\Phi$	5500
Vyzařovací úhel (°)	$\varphi$	120

Z těchto parametrů je možné vypočítat světelnou účinnost zdroje světla.

$$\eta_{sv} = \frac{\Phi}{P} = \frac{5500}{50} = 110 \text{ lm/W} \quad (5.9)$$

Kde:  $\Phi$  – světelný tok (lm),  $P$  – výkon osvětlení (W).

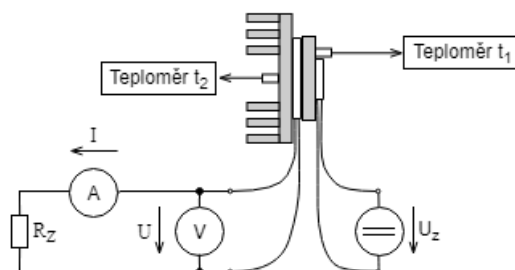
Účinnosti solárních článků při použití této metody odpovídají:

$$\eta_{M\check{C}2} = \frac{P_{MPP1}}{\frac{E_V \cdot S_{M\check{C}}}{\eta_{sv}}} = \frac{77,83 \cdot 10^{-3}}{\frac{10 \cdot 10^4 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3}}{110}} \cdot 100 = 6,85 \% \quad (5.10)$$

$$\eta_{V\check{C}2} = \frac{P_{MPP2}}{\frac{E_V \cdot S_{V\check{C}}}{\eta_{sv}}} = \frac{219,83 \cdot 10^{-3}}{\frac{10 \cdot 10^4 \cdot 2,5 \cdot 10^{-3}}{110}} \cdot 100 = 9,67 \% \quad (5.11)$$

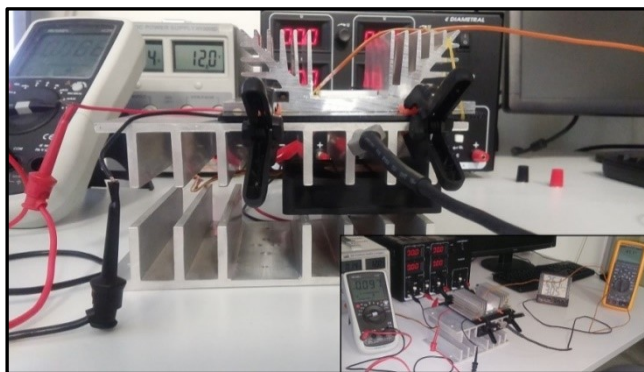
## 5.2 Peltierův článek

Jak můžeme vidět na měřicím schématu nacházejícím se na obrázku 21, mezi oběma články je z důvodu jejich rozdílných proporcí umístěn hliníkový mezichladič. Plní funkci rozváděče tepla a redukuje tak vliv nerovnoměrného rozložení tepla na ohřívané straně termogenerátoru. Tloušťka stěny hliníku mezi oběma články činí přibližně 5 mm.



**Obrázek 21** Měřicí schéma termoelektrického generátoru

Mezichladič má stejnou tloušťku jako rovná plocha chladiče připevněného na studenou stranu TEG1-127020S (plocha mimo žebrování). Díky tomu teplotní diference odpovídá přibližně stejnému rozdílu teplot, jako v případě umístění teploměrů přímo na desky měřených článků. Měření teplot zajistil digitální multimetr FLUKE 289 s možností připojení teplotní sondy a digitální teploměr s termočlánkem. Oba teploměry byly umístěny na vnějších stranách obou chladičů (rozváděčů tepla).



**Obrázek 22** Řetězec měření termoelektrického generátoru

Měření proběhlo za použití dvou Peltierových článků. Pro testování principu sběru energie byl zvolen termoelektrický generátor TEG1-127020S o maximálním výkonu 8,5 W. Druhý článek byl použit k ohřevu teplé strany článku TEG a vytvoření teplotního gradientu. K tomuto účelu posloužil článek TES1-127040S o maximálním topném výkonu  $Q_{MAX} = 37 \text{ W}$  [23].

Při měření byla použita zátěž v podobě rezistoru. Velikost odporu zátěže jsem se rozhodl zvolit stejnou jako výrobce termoelektrického generátoru. Dle datového listu tedy

odpovídá odporu o velikosti  $R_Z = 1,8 \Omega$  [24]. Účinnost soustavy pro měření termogenerátoru je vypočtena jako poměr výkonu na zátěži  $R_Z$  vzhledem k dodanému topnému výkonu, který odpovídá příkonu topného článku.

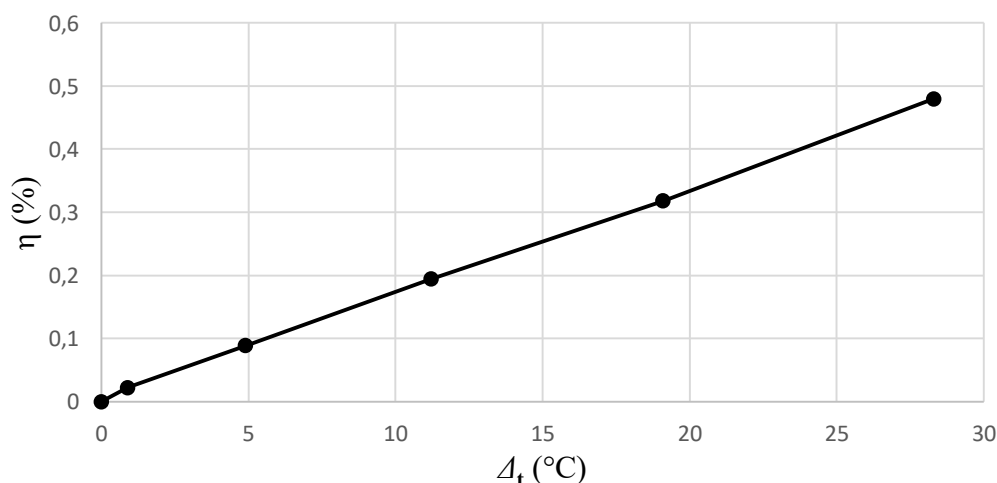
$$\eta_{\text{TEG}} = \frac{P_{\text{TEG}}}{P_{\text{TOP}}} = \frac{U_R \cdot I_R}{U_Z \cdot I_Z} \cdot 100 (\%) \quad (5.12)$$

kde:  $\eta_{\text{TEG}}$  - účinnost termoelektrického generátoru (%),  $P_{\text{TEG}}$  - výkon dodaný termogenerátorem (W),  $P_{\text{TOP}}$  - topný výkon dodaný termogenerátoru (W),  $U_R$  - napětí zátěže (V),  $I_R$  - proud protékající zátěží (mA),  $U_Z$  - napětí topného článku (V),  $I_Z$  - proud protékající topným článkem (mA).

Aby bylo dosaženo rovnoměrného rozložení tepla na zahříváné straně termogenerátoru bylo zapotřebí uvažovat také tepelnou setrvačnost celého systému, respektive použitých chladičů. Proto měření probíhalo vždy po ustálení teploty na teplé straně měřeného systému. Doba dostatečná pro ustálení teplot mezi měřeními odpovídala přibližně 15 minutám. Výsledky měření můžeme vidět v tabulce 2 a na obrázku 23.

**Tabulka 2** Měření termoelektrického generátoru při zátěži  $1,8 \Omega$

Teplá strana (TES1-127040S)				Chladná strana (TEG1-127020S)				$\Delta_t$	$\eta$
$U_Z$	$I_Z$	$P_{\text{TOP}}$	$t_1$	$U_R$	$I_R$	$P_{\text{TEG}}$	$t_2$		
V	A	W	°C	mV	mA	mW	°C	°C	%
0	0	0	23,90	2,80	0	0	24,00	-0,10	0
3	0,57	1,71	26,50	29,60	13,00	0,39	25,60	0,90	0,02
6	1,20	7,20	32,50	118,30	54,00	6,39	27,60	4,90	0,09
9	1,79	16,11	41,80	261,00	120,00	31,32	30,60	11,20	0,19
12	2,30	27,60	53,60	439,00	200,00	87,80	34,50	19,10	0,32
15	2,70	40,50	66,40	650,00	299,00	194,35	38,10	28,30	0,48



**Obrázek 23** Účinnost soustavy pro měření termoelektrického generátoru TEG1-127020S



### 5.3 Piezoaktuátor

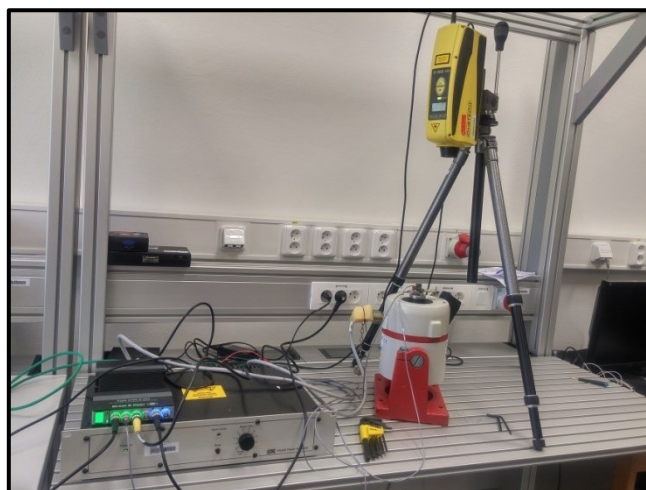
Jako zdroje energie byl pro měření zvolen piezoelektrický prvek od společnosti Mide – model PPA-4011, který můžeme vidět na obrázku 6. Jedná se o dražší prvek, jehož primární určení je využití právě v odvětví energy harvesting. PPA-4011 je samozřejmě možné použít také jako senzor. Vzhledem k jeho vysoké tuhosti není vhodné jej používat jako aktuátor, mohlo by dojít k poškození piezokeramiky. Je vyroben ze čtyř vrstev piezoelektrického materiálu vtěsnaného mezi dvě měděné plochy.

**Tabulka 3** Výstupní parametry PPA-4011 při použití jako zdroj energie (převzato a upraveno z [25])

Amplituda zrychlení	Frekvence	Přídavná hmotnost	RMS Výkon	RMS Napětí	RMS Proud	Odpor	RMS Napětí naprázdno	Výchylka P2P
g	Hz	gram	mW	V	mA	k $\Omega$	V	mm
0,25	298	0	0,1	0,5	0,3	1,9	1,1	0,2
0,5	297	0	0,5	0,8	0,5	1,5	1,9	0,3
1	293	0	1,4	1,2	1,1	1,1	3,2	0,5
2	289	0	4,5	2,4	1,9	1,2	5,4	0,8
0,25	63	25,3	1,9	3,9	0,5	8,1	7,3	1,3
0,5	63	25,3	5,6	6,9	0,8	8,5	12,0	1,9
1	62	25,3	18	10,6	1,7	6,2	19,3	2,7
2	62	25,3	52	16,2	3,2	5	31,1	3,7
0,25	60	28,4	2,1	4	0,5	7,5	7,9	1,2
0,5	60	28,4	6,4	7,7	0,8	9,4	12,9	1,8
1	60	27,1	19,5	10,2	1,9	5,4	20,2	2,4
2	60	26,6	59	16,7	3,5	4,7	31,4	4,1

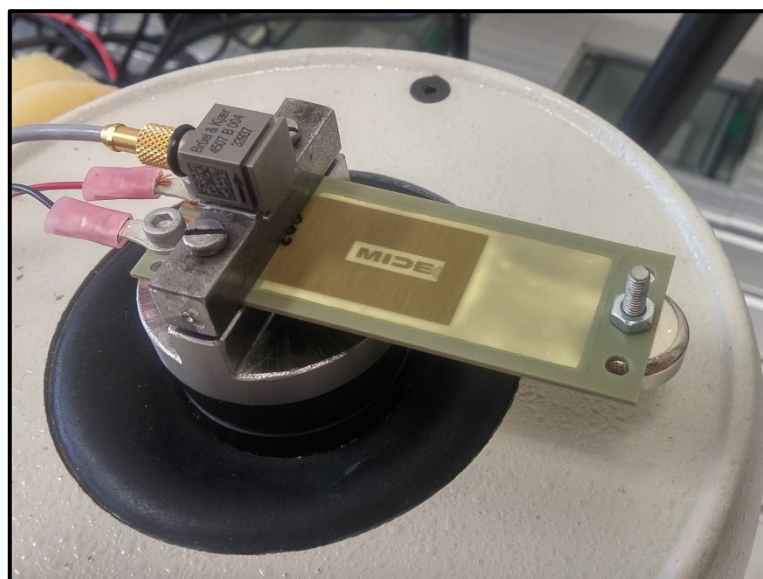
Piezoelektrické materiály produkují elektrickou energii na základě jejich deformace, která může být způsobena například vibracemi materiálu. Při měření výstupního výkonu piezoaktuátoru bylo tedy nutné zajistit zdroj vibrací. Za účelem buzení piezoaktuátoru byl použit elektrodynamický vibrátor LDS V406, tak zvaný shaker, od společnosti Brüel & Kjær. Jeho napájení zajistil výkonový zesilovač LDS PA25E. Při této kombinaci je shaker schopen vibrovat s maximální silou 98 N při sinusovém vstupním signálu [26].

Pro záznam měřených hodnot a jako generátor budícího signálu byl použit kombinovaný modul generátoru a měřicí karty TYPE 3160-A-042, taktéž od společnosti Brüel & Kjær. Modul se propojuje s počítačem pomocí LAN kabelu. Veškerou komunikaci a zpracování dat zajistilo uživatelské prostředí aplikace PULSE<sup>TM</sup> LabShop.



**Obrázek 24** Řetězec měření piezoaktuátoru

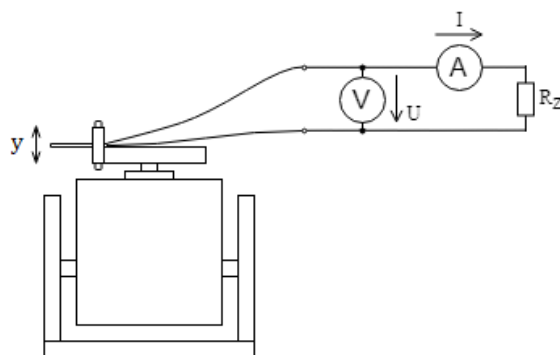
Pro upevnění piezoelementu k vibrátoru byla vyrobena čelist, ke které byl prvek uchycen skrze montážní díry pomocí šroubového spojení. V zájmu měření bylo také měření výchylky deformace. Z důvodu vibrování celé soustavy bylo zapotřebí změřit výchylky na obou stranách piezoelementu. Jedna strana byla měřena pomocí akcelerometru měřícího zrychlení, které bylo použitou aplikací dvakrát integrováno a tak získána poloha, respektive výchylka na straně čelisti. Výchylka na druhém konci piezoelementu, konkrétně na závaží, byla měřena pomocí laseru pracujícího na principu Dopplerova jevu. Laser měří rychlost, takže výsledky byly integrovány pouze jednou. Celou soustavu s akcelerometrem i bodem měření laseru (červená tečka na závažíčku) můžeme vidět na obrázku 25.



**Obrázek 25** Soustava k měření piezoelementu

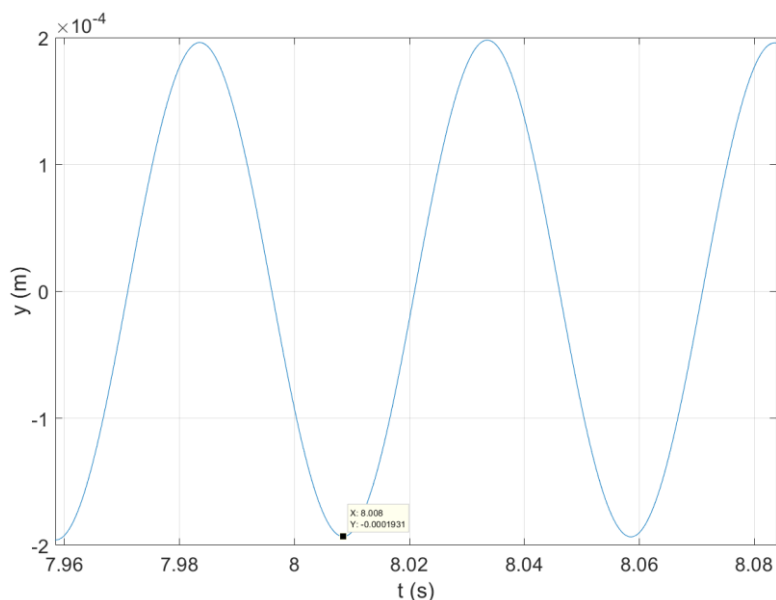
Měření rezonančních frekvencí probíhá vybuzením piezoaktuátoru bílým šumem. To je širokopásmový typ signálu, který se skládá ze zvoleného spektra frekvencí, jež má ve

všech místech spektra stejnou hodnotu výkonu. Pro každou frekvenci bílého šumu se změřila výchylka. V tomto případě se měřily výchylky dvě -na čelisti a na hmotné zátěži umístěné na piezoaktuátoru. Poměr výchylky na závaží vzhledem k výchylce na čelisti určuje zesílení mezi těmito dvěma body. Každé frekvenci odpovídá určité zesílení a největší výchylky volného konce piezoaktuátoru nastávají právě při rezonančních frekvencích. Frekvenční odezvu piezoaktuátoru můžeme vidět v příloze C.



**Obrázek 26** Měřicí schéma piezoaktuátoru

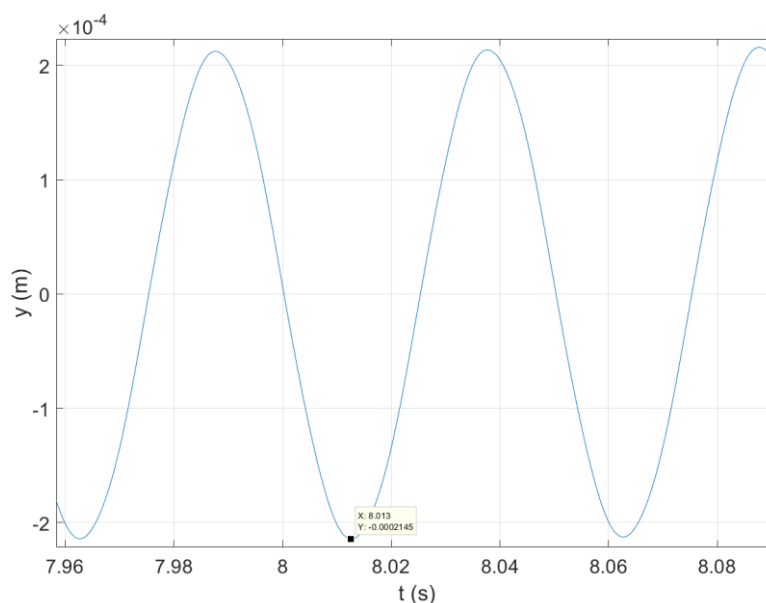
Z výsledku měření odezvy piezoaktuátoru na bílý šum bylo možné vyvodit frekvence, při kterých je piezoaktuátor nejvíce namáhán a díky tomu zvolit vhodné frekvence pro měření výkonových charakteristik. Vzhledem k tomu, že největší výchylka vibrací se projevuje při frekvencích rezonančních, rozhodl jsem se pohybovat primárně v jejich blízkosti.



**Obrázek 27** Průběh výchylky vibrací na straně akcelerometru

Měření proběhlo jak bez zátěže, tak se zátěží v podobě rezistoru o velikosti odporu  $R_Z = 1027 \Omega$ . Při zátěži byly pro každou frekvenci zaznamenány průběhy vibrací na obou stranách piezoaktuátoru. Průběhy můžeme vidět na obrázcích 27 a 28.

Průběhy byly uloženy do textového dokumentu pomocí funkce „Save Active Curve“ aplikace PULSE<sup>TM</sup> LabShop, upraveny pomocí Excelu a následně importovány do prostředí MATLAB.



**Obrázek 28** Průběh výchylky vibrací na straně laseru

Měření každé frekvence probíhalo po dobu 10 s. Pro přibližné zjištění skutečné výchylky piezoaktuátoru jsem pro jednotlivé průběhy v čase 8 s (po ustálení) vyčetl maximální výchylku (amplitudu). Přibližná výchylka  $\Delta_A$  byla zjištěna jako rozdíl amplitud dle rovnice (5.13). Zesílení bylo vypočteno jako poměr amplitud dle rovnice (5.14). Výsledky odpovídající rezonančním frekvencím můžeme vidět v tabulce 4 a výsledky všech frekvencí nalezneme v příloze D.

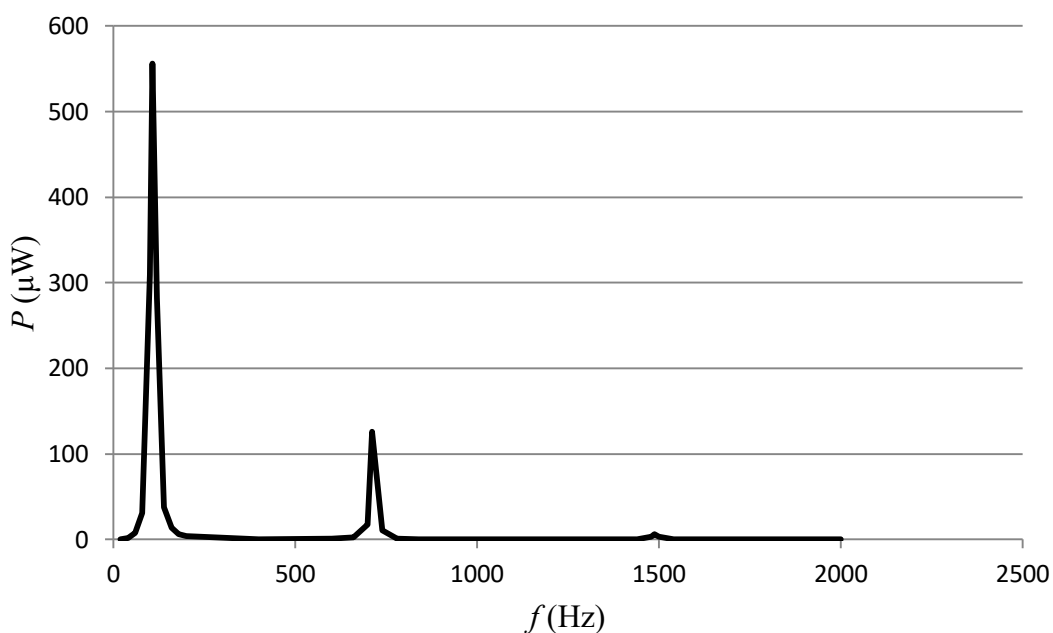
$$\Delta_A = A_{LAS} - A_{AKC} \text{ (m)} \quad (5.13)$$

$$k = \frac{A_{LAS}}{A_{AKC}} \text{ (-)} \quad (5.14)$$

kde:  $\Delta_A$  - přibližná amplituda volného konce (m),  $k$  - zesílení měřeného systému (-),  $A_{LAS}$  - amplituda měřená na závaží laserem (m),  $A_{AKC}$  - amplituda měřená na čelisti akcelerometrem (m).

**Tabulka 4** Měření piezoaktuátoru při rezonančních frekvencích (závaží 5 g)

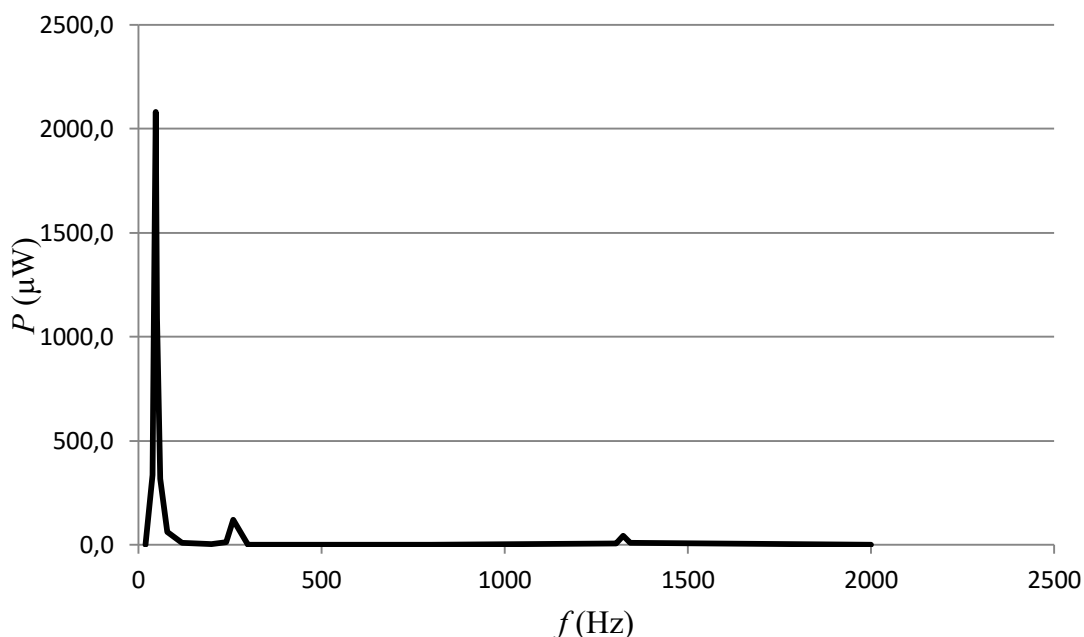
	Nulová zátěž		Zátěž $R_Z = 1026 \Omega$				
$f$	$U_0$	$I_{ZKR}$	$U_R$	$I_R$	$P$	$\Delta_A$	$k$
Hz	mV	$\mu A$	mV	$\mu A$	$\mu W$	$\mu m$	-
108	2557,00	847,80	764,50	727,10	555,87	186,98	10,48
712	597,00	670,10	371,66	339,62	126,22	5,32	8,44
1488	94,49	290,40	85,65	76,78	6,58	0,68	1,83

**Obrázek 29** Výkonovo-frekvenční charakteristika piezoaktuátoru (závaží 5 g)

Pro porovnání vlivu hmotné zátěže na produkci energie bylo měření provedeno také pro hmotnou zátěž o velikosti 30 g. Toho bylo docíleno zvýšením počtu závažíček na 6. Změna hmotné zátěže ovlivnila také frekvenční odezvu piezoaktuátoru na bílý šum, výsledek můžeme vidět v příloze E. Výsledky odpovídající rezonančním frekvencím můžeme vidět v tabulce 5 a výsledky všech frekvencí nalezneme v příloze F.

**Tabulka 5** Měření piezoaktuátoru při rezonančních frekvencích (závaží 30 g)

	Nulová zátěž		Zátěž $R_Z = 1026 \Omega$				
$f$	$U_0$	$I_{ZKR}$	$U_R$	$I_R$	$P$	$\Delta_A$	$k$
Hz	mV	$\mu A$	mV	$\mu A$	$\mu W$	$\mu m$	-
48	10934,6	1502,5	1465,2	1420,8	2081,5	675,7	11,2
260	721,8	424,1	356,2	336,9	119,9	2,6	1,7
1324	288,1	589,2	222,3	202,9	45,0	0,1	1,1



**Obrázek 30** Výkonovo-frekvenční charakteristika piezoaktuátoru (hmotná zátěž 30 g)

Účinnost piezoaktuátoru je poměrně obtížné stanovit. Je dána tak zvaným piezoelektrickým coupling faktorem a udává efektivitu, s jakou je daný piezoelektrický materiál schopen převést mechanickou energii na energii elektrickou nebo opačně. Jedná se tedy o poměr výstupní elektrické energie vzhledem ke vstupní mechanické energii [27].

$$k_f = \sqrt{\frac{E_{EL}}{E_{MECH}}} \quad (5.15)$$

kde:  $k_f$  – piezoelektrický coupling faktor (–),  $E_{EL}$  – výstupní elektrická energie,  $E_{MECH}$  – výstupní mechanická energie.

Při měření jsem zjistil hodnotu elektrické energie  $E_{EL}$ , která je rovna efektivní hodnotě výkonu  $P$  na zatěžovacím rezistoru. Pro výpočet je tedy nutně zjistit výkon, který byl soustavě při měření dodán. Vzhledem ke skutečnosti, že vstupní vibrace jsou z praktického hlediska harmonicky kmitavý pohyb, může být měřená poloha zpětně přepočtena na rychlost a zrychlení pomocí rovnic pro harmonický pohyb [28].

$$y = y_m \cdot \sin(\omega \cdot t) = y_m \cdot \sin(2\pi f \cdot t) \quad (5.16)$$

$$v = \omega \cdot y_m \cdot \cos(\omega \cdot t) = 2\pi f \cdot y_m \cdot \cos(2\pi f \cdot t) \quad (5.17)$$

$$a = -\omega^2 \cdot y_m \cdot \sin(\omega \cdot t) = -(2\pi f)^2 \cdot y_m \cdot \sin(2\pi f \cdot t) \quad (5.18)$$

kde:  $y$  – okamžitá výchylka (m),  $y_m$  – maximální výchylka (m),  $\omega$  – úhlová frekvence ( $\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $f$  – frekvence (Hz),  $t$  – čas (s),  $v$  – okamžitá rychlost ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ),  $a$  – okamžité zrychlení ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$ )

Z výpočtu okamžitého zrychlení je možné zjistit budící sílu kmitání  $F_{\text{BUD}}$  a následně je možné vypočítat také výkon budící síly  $P_{\text{BUD}}$ .

$$F_{\text{BUD}} = m \cdot a \text{ (N)} \quad (5.19)$$

kde:  $F_{\text{BUD}}$  – budící síla (N),  $m$  – hmotnost soustavy (kg).

$$P_{\text{BUD}} = F_{\text{BUD}} \cdot v \text{ (W)} \quad (5.20)$$

kde:  $P_{\text{BUD}}$  – výkon budící síly (W).

Příklad výpočtu pro rezonanční frekvenci 48 Hz při hmotné zátěži 30 g. Hodnota maximální výchylky  $y_m$  odpovídá amplitudě na straně akcelerometru  $\Delta_{\text{AKC}}$ .

$$v = 2\pi \cdot 48 \cdot 66,10 \cdot 10^{-6} \cdot \cos(2\pi \cdot 48 \cdot 8) = 6,79 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.21)$$

$$a = -4\pi^2 \cdot 48^2 \cdot 66,10 \cdot 10^{-6} \cdot \sin(2\pi \cdot 48 \cdot 8) = 5,65 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} \quad (5.22)$$

Pro výpočet velikosti budící síly je zapotřebí znát hmotnost celé soustavy připevněné na shaker. Hmotnost soustavy byla změřena digitální váhou a odpovídá přibližně 120 g při měření s hmotnou zátěží 5 g a přibližně 145 g pro hmotnou zátěž 30 g.

$$F_{\text{BUD}} = 0,145 \cdot 5,65 = 0,82 \text{ N} \quad (5.23)$$

$$P_{\text{BUD}} = 0,82 \cdot 6,79 = 5,56 \text{ mW} \quad (5.24)$$

V konečném důsledku je možné vypočítat také výše zmíněný coupling faktor.

$$k_f = \sqrt{\frac{E_{\text{EL}}}{E_{\text{MECH}}}} = \sqrt{\left| \frac{P}{P_{\text{BUD}}} \right|} = \sqrt{\left| \frac{2,08}{5,56} \right|} \cdot 100 = 61,21 \% \quad (5.25)$$

Výsledky výpočtů piezoelektrického coupling faktoru pro rezonanční frekvence je možno vidět v tabulce 6 pro hmotnou zátěž 30 g a v tabulce 7 pro hmotnou zátěž o velikosti 30 g.

**Tabulka 6** Účinnost piezoaktuátoru - závaží 5 g

$f$	$v$	$a$	$F_{\text{BUD}}$	$P_{\text{BUD}}$	$\left  \frac{P}{P_{\text{BUD}}} \right $	$k_f$
Hz	$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	N	mW	-	%
108	-12,37	3,44	0,41	-5,11	108,69	32,97
712	2,43	-9,28	-1,11	-2,71	46,57	21,58
1488	7,49	15,56	1,87	13,98	0,47	2,17

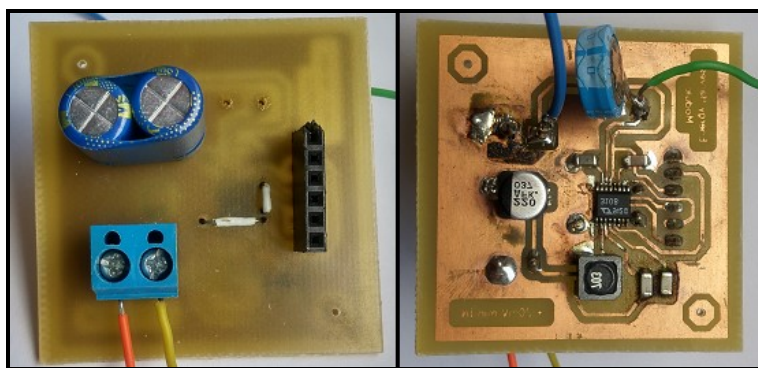
**Tabulka 7** Účinnost piezoaktuátoru - závaží 30 g

$f$	$v$	$a$	$F_{\text{BUD}}$	$P_{\text{BUD}}$	$\left  \frac{P}{P_{\text{BUD}}} \right $	$k_f$
Hz	$\text{mm} \cdot \text{s}^{-1}$	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$	N	mW	-	%
48	6,79	5,65	0,82	5,56	$374,66 \cdot 10^{-3}$	61,21
260	5,49	3,19	0,46	2,54	$47,27 \cdot 10^{-3}$	21,74
1324	-7,24	64,37	9,33	-67,60	$0,67 \cdot 10^{-3}$	2,58



## 6 Měření s LTC3108

K měření byla použita PCI Express vstupně-výstupní měřicí karta MF634 od společnosti Humusoft využívající nadstavbu Simulink pro aplikaci MATLAB. Karta disponuje 8 A/D převodníky, takže je možné měřit všechny potřebné vstupy najednou a kontrolovat jejich hodnoty v reálném čase. Kapacita nabíjeného superkapacitoru činí 0,5 F při 6V a je připojen na výstup VOUT měniče LTC3108.



**Obrázek 31** *Energy harvesting jednotka LTC3108*

Pro měření jsem použil energy harvesting jednotku, která byla vytvořena a mně poskytnuta vedoucím této práce. Jedná se o základní zapojení vyobrazené na obrázku 15.

### 6.1 Model v aplikaci MATLAB Simulink

Ke čtení a uložení dat z měřicí karty vznikl měřicí model, který vidíme v příloze G. Pro všechny části modelu platí, že bloky *Analog Input* čtou analogové hodnoty zaznamenané měřicí kartou a bloky *To Workspace* tyto hodnoty následně ukládají jako proměnné do pracovní plochy aplikace MATLAB pod odpovídajícím názvem (tzn. názvem bloku). Bloky *Scope* slouží ke grafickému znázornění čtených hodnot, přičemž je možné je sledovat v reálném čase.

Popis částí MATLAB Simulink modelu:

- Část 1 - uložení časové stopy simulace,
- Část 2 - měření napěťových průběhů na pinech EH jednotky,
- Část 3 - napěťový výstup (nevyužito),
- Část 4 - měření proudového průběhu při vybíjení superkapacitoru.

Část 4 slouží k měření průběhu vybíjecího proudu výstupu VOUT. To bylo docíleno měřením napětí „za“ jedním ze zatěžovacích rezistorů a následně pomocí bloku *Subtract* odečtením tohoto napětí od napětí výstupu VOUT. Tento výpočet odpovídá úbytku napětí

na rezistoru při zátěži, který je pomocí Ohmova zákona přepočítán na proud. To má za úkol blok Gain, jehož zesílení odpovídá převrácené hodnotě odporu rezistoru.

## 6.2 Nabíjení superkapacitoru

Prvotní měření nabíjení superkapacitoru se solárními články jsem se rozhodl provést nejprve pro stejné vstupní napětí přibližně 200 mV a ověřit tak korektní funkci EH obvodu. To znamená, že intenzita osvětlení solárních článků byla rozdílně nastavena tak, aby odpovídala tomuto napětí. Výsledky se i přes velice podobné vstupní podmínky mírně liší.

Druhé měření proběhlo za podmínky stejné intenzity osvětlení. Pro simulaci reálnějších pracovních podmínek jsem provedl měření intenzity osvětlení pod přímým sluncem, tedy ve venkovních podmínkách. Měření proběhlo 10. 4. 2019 přibližně v 11:30. Pomocí měření 10 vzorků na různých místech v prostorech kampusu VŠB – Technické univerzity jsem získal intenzitu 59 746 lx. Výsledky můžeme vidět v tabulce 8.

Po připojení velkého solárního článku k EH jednotce LTC3108 a zvyšování intenzity osvětlení jsem zjistil, že při 60 klx není možné měření provést. Důvodem je přesažení maximálního vstupního napětí 0,5 V při použití vstupního transformátoru se zesílením 1:100. Proto jsem se rozhodl intenzitu osvětlení  $E$  snížit na 40 klx. Výsledky všech měření můžeme vidět v tabulce 9 a průběhy jednoho z měření na obrázku 32.

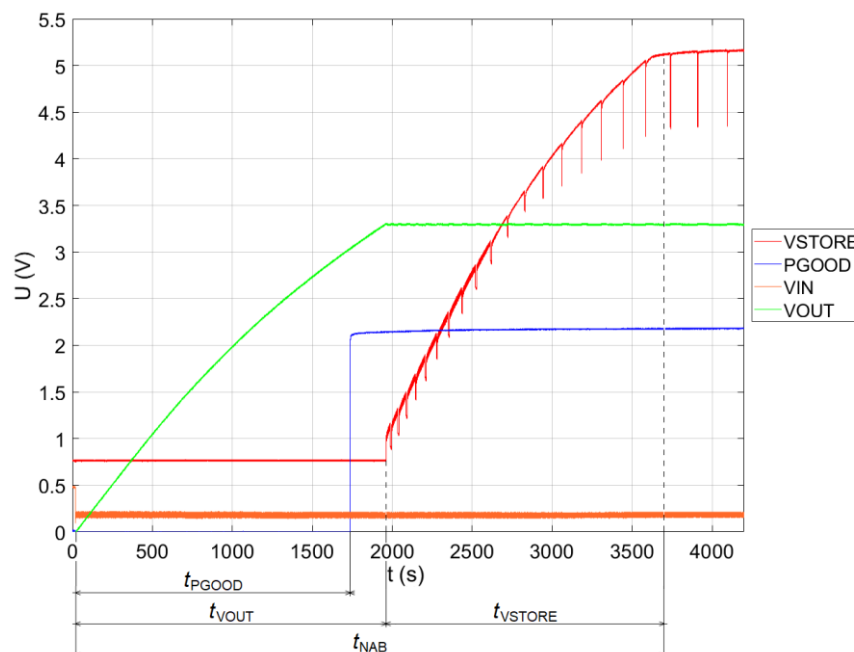
**Tabulka 8** Měření intenzity slunečního záření

$n$	$E$
1	58630
2	61230
3	61570
4	59930
5	63270
6	55130
7	60170
8	61570
9	59030
10	56930
Ø	59746

V případě napájení LTC3108 pomocí termoelektrického generátoru jsem se rozhodl provést měření doby nabíjení pro vstupní difference  $\Delta t$  o velikosti 10 °C a 15 °C.

**Tabulka 9** Měření nabíjení superkapacitoru 0,5F

	$E$	$\Delta t$	$U_{IN}$	$I_{IN}$	$t_{PGOOD}$	$t_{VOUT}$	$t_{VSTORE}$	$t_{NAB}$
	lx	°C	mV	mA	hh:mm:ss	hh:mm:ss	hh:mm:ss	hh:mm:ss
Malý FČ	87,5k		212	82	0:28:57	0:32:30	0:29:10	1:01:40
	40k		112	39	0:56:10	1:05:00	1:15:00	2:20:00
Velký FČ	14,6k		212	82	0:28:21	0:31:52	0:27:38	0:59:30
	40k		471	183	0:12:50	0:13:45	0:11:15	0:25:00
TEG		10	233	75	0:28:26	0:31:34	0:28:26	1:00:00
		15	330	125	0:19:47	0:22:09	0:21:26	0:43:35



**Obrázek 32** Nabíjení superkapacitoru při vstupním napětí EH jednotky 212 mV

### 6.3 Vybíjení superkapacitoru

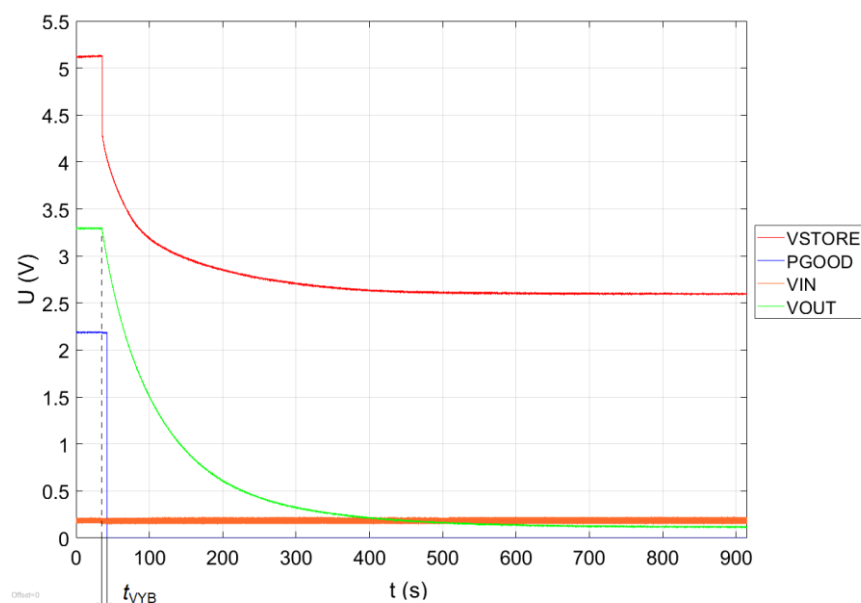
Při měření vybíjení superkapacitoru byla použita odporová zátěž, jejíž velikost byla pomocí Ohmova zákona vypočtena pro simulaci odběru proudu o velikosti 25 mA.

$$R_Z = \frac{V_{OUT}}{I_Z} = \frac{3,3}{0,025} = 132 \, \Omega \quad (6.1)$$

V průběhu vybíjení jsem se rozhodl ponechat připojené napájení, respektive zdroj energie, a sledovat rozdíly v délce napájení od doby připojení zátěže po dobu dosažení práhu minimálního napětí výstupu VOUT. Za čas vybití tedy považuji čas, kdy dojde ke změně stavu výstupu PGOOD. Výsledky můžeme vidět v tabulce 10 a průběhy jednoho z měření na obrázku 33.

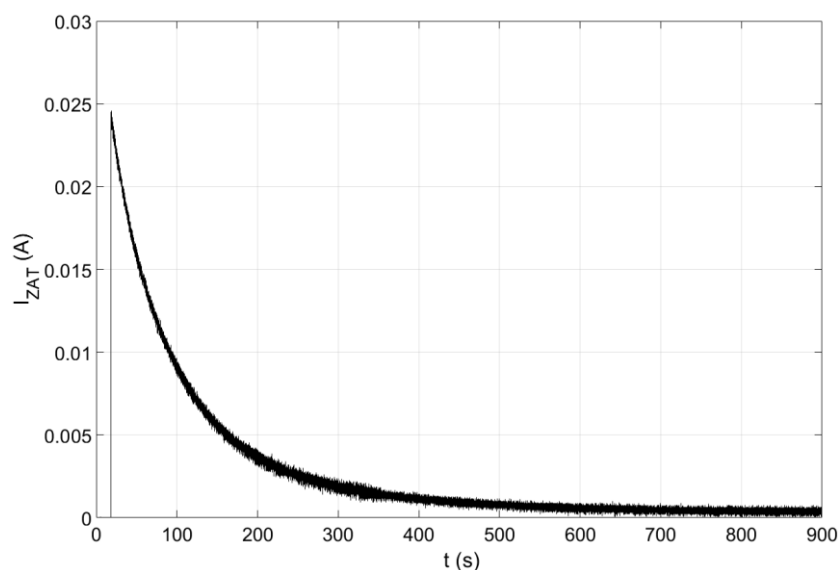
**Tabulka 10** Měření vybíjení superkapacitoru 0,5F

	$E$	$\Delta t$	$U_{IN}$	$I_{IN}$	$t_{VYB}$
	lx	°C	mV	mA	s
Malý FČ	87,5k		212	82	6,52
	40k		112	39	6,48
Velký FČ	14,6k		212	82	6,53
	40k		471	183	6,71
TEG		10	233	75	6,55
		15	330	125	



**Obrázek 33** Vybíjení superkapacitoru při zátěži 132  $\Omega$

Měřen byl také průběh proudu na výstupu VOUT při zátěži. Zátěž sestávala z více rezistorů, přičemž popis měření je již uveden v kapitole 3.1. Prakticky se jedná o měření průběhu úbytku napětí na rezistoru a jeho následném přepočtení na proud. Výsledek můžeme vidět na obrázku 33.



**Obrázek 34** Průběh proudu při vybíjení zátěží 132  $\Omega$

## 7 Závěr

Tato bakalářská práce se zabývá seznámením se se zdroji napájení typu energy harvesting a jejich využití pro napájení nízko-příkonových zařízení. Energy harvesting je dle mého názoru velmi pokrokové odvětví, jež má v budoucnu své místo pro napájení nejen senzorických zařízení, ale také zařízení s vyšším odběrem. Napříč zdroji pro sběr energie se ovšem potýkáme nízkou účinností a závislostí na okolních podmínkách dle zvoleného zdroje napájení. Každý zdroj napájení tak má své výhody a nevýhody a je nutné zvolit takový zdroj napájení, který je určené provozní podmínky nejvhodnější. Výhodou všech těchto zdrojů jsou nulové emise, absence pohyblivých částí a hlavně to, že jsou schopny napájet zařízení na místech bez rozvodné sítě.

Solární články nebyly měřeny za standardních podmínek při výkonové hustotě světelného zdroje  $1000 \text{ W/m}^2$ , ale při osvitu 100 klx. Závislosti proudu a výkonu na napětí byly i přes tuto změnu vstupních podmínek úspěšně změřeny a je možné je vidět na obrázcích 18 a 19. Malý solární článek produkoval maximální výkon 77,83 mW při zátěži rezistorem o velikosti  $1,35 \Omega$ . Na druhou stranu velký solární článek produkoval výkon 219,83 mW při zátěži  $0,65 \Omega$ . Při výpočtu pomocí světelné účinnosti odpovídala účinnost článků 6,85 % a 9,67 %, respektive. Odhadovaná hodnota účinnosti je nižší z důvodu vyššího výkonu světelného zdroje ve výpočtu, ale je zjevné, že i tento odhad je poměrně přesný. Vyšší efektivita velkého článku je dána prakticky dvojnásobnou plochou dopadajícího světla. Výhodou je využití prakticky nevyčerpatelného zdroje energie, je ale nutné zamezit zastínění článku. Další nevýhodou je závislost na denní době.

Při měření termoelektrického generátoru byly použity dva články – jeden topný (TES1-127040S) pro vytvoření teplotní difference a druhý jako zdroj energie (TEG1-127020S). Výkon produkovaný generátorem při určitých teplotních diferencích vidíme v tabulce 2. Při výpočtu efektivit soustavy s termoelektrickým generátorem jsem vycházel z faktu, že topný výkon článku odpovídá jeho příkonu. Charakteristikou účinnosti při zátěži rezistorem o odporu  $1,8 \Omega$ , kterou vidíme na obrázku 23, je téměř lineární křivka. Dá se tedy říci, že efektivita měřené soustavy s termoelektrickým generátorem je přímo úměrná teplotě, respektive teplotní diferencí mezi jeho dvěma stranami. Mezi výhody patří vysoká teplotní a mechanická odolnost a nezávislost na denní době. Nevýhodou je nutnost zajištění chlazení pro studenou stranu termogenerátoru, které zabírá mnoho místa.

Piezoaktuátor byl měřen bez zátěže a také s odporovou zátěží o velikosti  $1026 \Omega$ . Velikost generované energie je závislá primárně na velikosti deformace piezoelektrické

vrstvy. Aby byla deformace zvýšena, bylo tedy na piezoaktuátor připevněno závaží o hmotnosti 5 g. Samotný prvek je ovšem poměrně tuhý a závaží o uvedené hmotnosti nemělo na měření téměř žádný vliv. Při měření jsem vycházel z předpokladu, že největší deformace nastává při rezonančních frekvencích piezoaktuátoru. Pomocí frekvenční odezvy na bílý šum byly zjištěny tři rezonanční frekvence 108 Hz, 712 Hz a 1488 Hz. K největší deformaci docházelo při frekvenci 108 Hz při zesílení 10,5 a přibližné amplitudě 187  $\mu\text{m}$ . Produkovaný výkon odpovídá 0,56 mW. Výsledky měření s hmotnou zátěží o velikosti 5 g byly vyneseny formou grafu na obrázku 29. Efektivita přeměny elektrické energie byla výpočtem stanovena na 32,97 % pro rezonanční frekvenci 108 Hz.

Pro zvýšení produkovaného výkonu, respektive deformace, byla zvýšena hmotná zátěž piezoaktuátoru na 30 g. Měření proběhlo stejným způsobem a při odezvě na bílý šum byly zjištěny rezonanční frekvence 48 Hz, 260 Hz a 1324 Hz. Největší deformace nastala při frekvenci 48 Hz při zesílení 11,2 a přibližné amplitudě 675,7  $\mu\text{m}$ . Produkovaný efektivní výkon při této frekvenci odpovídá 2,08 mW. Výsledky měření jsou uvedeny na obrázku 30, přičemž nejvyšší efektivita přeměny byla zjištěna o velikosti 61,21 %.

Pro měření s energy harvesting jednotkou byly vybrány solární články a termoelektrický generátor. Z toho vyplývá použití obvodu LTC3108. Délka nabíjení superkapacitoru je závislá na vstupním výkonu, přičemž k nejrychlejšímu nabití došlo při použití velkého solárního článku při intenzitě osvětlení 40 klx za necelých 14 minut. V praxi je tak opakované použití pro napájení senzoru závislé na vstupním výkonu do energy harvesting obvodu. Typický průběh nabíjení vidíme na obrázku 32 a ostatní doby nabíjení v tabulce 9.

Při vybíjení superkapacitoru byly použity stejné podmínky jako v případě nabíjení, kdy byly napájecí zdroje připojeny k energy harvesting obvodu. V tabulce 10 vidíme, že doby vybíjení se při vybíjecím proudu o velikosti 25 mA liší pouze nepatrně. Rozdíl mezi nejnižším a nejvyšším vstupním výkonem zapříčinil prodloužení vybíjecího času o 0,23 s. Průběhy vybíjení se nalézají na obrázku 33 a průběh vybíjecího proudu na obrázku 34.

Při porovnání zdrojů energie pro napájení senzorů je nutné znovu vycházet z provozních podmínek, protože závisí na výhodách a nevýhodách samotných zdrojů napájení. Vzhledem k tomu, že pro napájení senzorů se typicky používá energy harvesting obvod, závisí četnost měření na době, za kterou se nabije použitý superkapacitor, respektive na vstupním výkonu do obvodu. Doba napájení senzoru se odvíjí primárně od velikosti použitého kapacitoru.

## Použitá literatura

- [1] EDVINSSON, N. Energy harvesting power supply for wireless sensor networks.[cit. 2019-1-16] Upsala Universitet, Teknisknaturvetenskaplig fakultet UTH-enheten, 2013, pp. 68. ISSN: 1401-5757, TVE 13 058,
- [2] Piezoelectric energy harvesting devices: An alternative energy source for wireless sensors. [online], [cit 2019-02-09]. Dostupné z: <<https://www.hindawi.com/archive/2012/853481/>>,
- [3] GOETZBERGER, A. a HOFFMANN, V. U. Photovoltaic solar energy generation. New York: Springer, c2005. Springer series in optical sciences, v. 112. ISBN 3-540-23676-7,
- [4] Fotovoltaika. [online], Sdružení techniků a inženýrů ve stavebnictví a energetice. Poslední změna 17.06.2012. [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: <<http://www.tzb-energ.cz/fotovoltaika.html>>,
- [5] Fotovoltaika. [online], Solání (fotovoltaické) články. Skupina ČEZ [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: <<https://www.cez.cz/edee/content/microsites/solarni/k32.htm>>,
- [6] Tenkovrstvé piezoelektrické senzory [online]. VŠ chemicko-technologická, fakulta chemicko-inženýrská. Praha.[cit 2019-02-09] Dostupné z: <[https://fchi.vsc ht.cz/files/uzel/0010359/14\\_senzory\\_QCM.pdf](https://fchi.vsc ht.cz/files/uzel/0010359/14_senzory_QCM.pdf)>,
- [7] Advanced Ceramics in Piezo Applications. [online], CeramTex GmbH. Německo. [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: <[https://www.ceramtec.com/files/mf\\_broschure-piezoapplications\\_en\\_de.pdf](https://www.ceramtec.com/files/mf_broschure-piezoapplications_en_de.pdf)>,
- [8] MORE, A. TAUNK, T. a SHUBHAM, F. Application of piezoelectric material on railway platform, temples, runways and roads to generate electricity. [online],Ahmednagar, Maharashtra India. 2014. [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: <<https://contest.techbriefs.com/2014/entries/sustainable-technologies/4092>>,
- [9] Usage temperatures of piezoceramic materials. [online] Piezo Technologies – Technical Resource Paper [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: <<http://www.piezo technologies.com/knowledge-desk/meggitt-termperature-usage-temperatures>>,

- [10] Cyklus Peltierovy termobaterie. [online], HW.cz, vše o elektronice a automatizaci. [cit. 2019-04-25]. Dostupné z: <<https://vyvoj.hw.cz//teorie-a-praxe/dokumentace/peltierovy-termobaterie.html>>,
- [11] DENER, M. A new gateway node for wireless sensor network applications. Graduate School of Natural and Applied Sciences, Gazi University, 06500, Ankara, Turkey, 2016, pp. 213-220. ISSN 1992-2248,
- [12] ABOZAHHAD, Mohammed. FARRAG, Mohammed. and ABDELHAY Ali. A comparative study of energy consumption sources for wireless sensor networks. Department of Electrical and Electronic Engineering, Assiut University, Assiut, Egypt, 2015, pp. 65-76. ISSN: 2005-4262 IJGDC,
- [13] First electricity generating concept tire. [online], [cit. 2019-04-7]. Dostupné z: <[https://www.goodyear.eu/corporate\\_emea/our-responsibilities/innovation/through-technologies.jsp](https://www.goodyear.eu/corporate_emea/our-responsibilities/innovation/through-technologies.jsp)>,
- [14] Goodyear concept tires offer a glimpse of the future. [online]. [cit. 2019-04-7]. Dostupné z: <<https://corporate.goodyear.com/en-US/media/news/Goodyear-Concept-Tires-Offer-a-Glimpse-of-the-Future-1426100308105.html>>,
- [15] Electric Vehicle Charging Could be Tire-Driven with Goodyear's BH-03. [online], [cit. 2019-04-7]. Dostupné z: <<https://www.greenoptimistic.com/ev-charging-tires-goodyear-bh03/>>,
- [16] LTC3588-1 Datasheet. [online], [cit. 2019-02-25]. Dostupné z: <<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/35881fc.pdf>>,
- [17] LTC3108 Datasheet. [online], [cit. 2019-03-12]. Dostupné z: <<http://cds.linear.com/docs/en/datasheet/3108fc.pdf>>,
- [18] QUASCHNING, Volker. Understanding Renewable Energy Systems. London: EarthScan, 2005. ISBN 1-84407-128-7,
- [19] Isolar - Fotovoltaika. [online], [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <<http://www.isolar.cz/technologie.html>>,
- [20] Manuál – Digitální luxmetr EM2243 [online], [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <<https://www.gme.cz/data/attachments/czn.769-267.1.pdf>>,



- [21] HEMSATH, L. Timothy and BANDHOSSEINI, A. Kaveh. Energy Modeling in Architectural Design. New York: Routhledge, 2018. ISBN 978-1-315-71290-1,
- [22] LED 50W Epistar, teplá bílá 3000K, 5300lm/1500mA,30-32V,120° [online]. [cit. 2019-04-12]. Dostupné z: <<https://www.hadex.cz/k173a-led-50w-epistar-tepla-bila-3000k-5300lm1500ma30-32v120/>>,
- [23] Termoelectric cooler performance specifications, TES1-127040-30X30. P&N Technology (Xiamen) Co.,Ltd. [online], [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <<https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.601-055.1.pdf>>,
- [24] Termoelectric generator performance specifications, TEG-127020-40X44. [online], [cit. 2019-04-26]. Dostupné z: <<https://www.gme.cz/data/attachment/dsh.601-057.1.pdf>>,
- [25] MIDÉ, PPA products. Datasheet & User Manual. [online]. [cit. 2019-04-11]. Dostupné z: <<http://info.mide.com/hubfs/ppa-piezo-product-datasheet.pdf?hsCtaTracking=b40269b7-eb42-4234-a7ae-d6b9bfa6f122%7C8b655dfb-a489-4b33-9a15-e1c5c381bb78>>,
- [26] Permanent magnet shaker LDS V406. [online], Brüel & Kjær. [cit. 2019-04-10]. Dostupné z: <<https://www.bksv.com/en/products/shakers-and-excitors/LDS-shaker-systems/permanent-magnet-shakers/V406>>,
- [27] Piezoelectric constants. [online], APC International, Ltd. [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: <<https://www.americanpiezo.com/piezo-theory/piezoelectric-constants.html>>,
- [28] Mechanické kmitání – Fyzika pro bakaláře (studijní opory). [online], VŠB – Technická univerzita. Dostupné z: <[http://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/Fyzikaprobakalare/PDF/1\\_7\\_1\\_netlum.pdf](http://www.studopory.vsb.cz/studijnimaterialy/Fyzikaprobakalare/PDF/1_7_1_netlum.pdf)>.

## **Seznam příloh**

Příloha A: Naměřené hodnoty A-V a P-V charakteristik malého solárního článku.

Příloha B: Naměřené hodnoty A-V a P-V charakteristik velkého solárního článku.

Příloha C: Frekvenční odezva soustavy pro měření piezoaktuátoru – závaží 5 g

Příloha D: Naměřené hodnoty piezoaktuátoru - závaží 5 g (bez zátěže, se zátěží)

Příloha E: Frekvenční odezva soustavy pro měření piezoaktuátoru – závaží 30 g

Příloha F: Naměřené hodnoty piezoaktuátoru - závaží 30 g (bez zátěže, se zátěží)

Příloha G: Model pro měření s LTC3108

**Příloha A:** Naměřené hodnoty A-V a P-V charakteristik malého solárního článku.

**Tabulka I** Naměřené hodnoty A-V a P-V charakteristik malého solárního článku

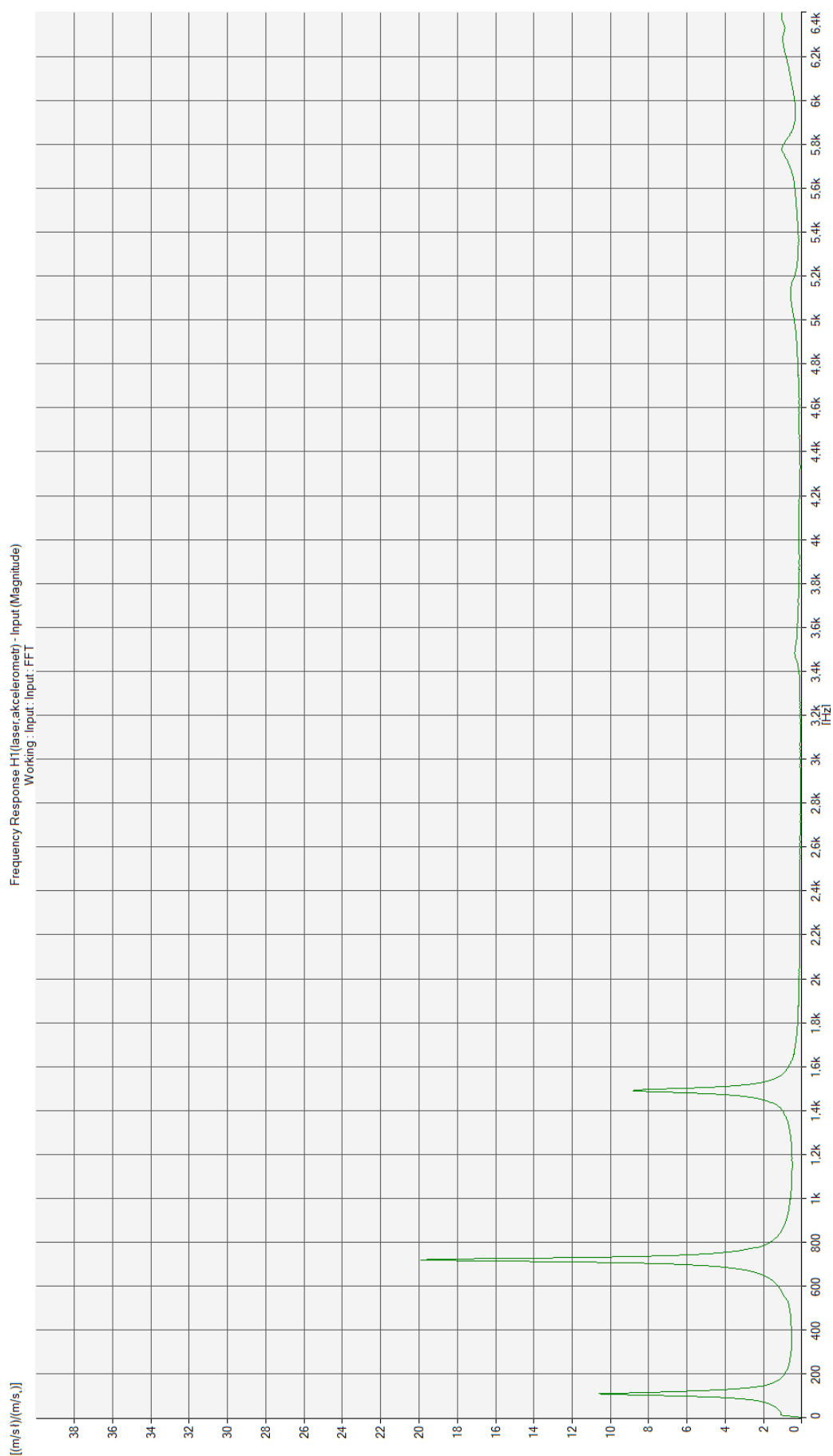
E	R	U	I	P
lx	$\Omega$	mV	mA	mW
100000	0	63,67	236,33	15,05
	0,05	78,00	236,00	18,41
	0,1	88,00	236,33	20,80
	0,4	161,33	235,67	38,02
	0,6	209,67	234,67	49,20
	1,2	332,67	223,00	74,18
	1,3	350,67	219,00	76,80
	1,35	362,00	215,00	77,83
	1,4	365,33	212,67	77,69
	1,6	384,67	200,33	77,06
	2,2	422,00	165,33	69,77
	3,3	446,00	124,00	55,30
	4,7	464,33	90,00	41,79
	8,2	478,00	55,33	26,45
	10,1	482,33	46,00	22,19
	20,2	491,00	21,00	10,31
	47,7	497,33	10,00	4,97
	100,1	499,33	4,79	2,39
	390	498,67	1,25	0,62
	820	498,00	0,60	0,30
	387k	498,00	0,88	0,44

**Příloha B:** Naměřené hodnoty A-V a P-V charakteristik velkého solárního článku.

**Tabulka II** *Naměřené hodnoty A-V a P-V charakteristik velkého solárního článku*

E	R	U	I	P
lx	$\Omega$	mV	mA	mW
100000	0	134,83	527,67	71,16
	0,05	170,33	529,00	90,12
	0,1	201,93	530,67	107,19
	0,4	371,20	519,67	192,87
	0,6	448,33	488,67	218,96
	0,65	461,33	476,67	219,83
	0,7	470,00	462,33	217,26
	0,75	477,33	449,67	214,61
	0,8	484,33	440,00	213,11
	1	505,67	383,67	194,03
	1,2	517,33	342,33	177,11
	2,2	545,67	218,33	119,14
	3,3	557,67	155,00	86,44
	4,7	564,00	111,33	62,79
	8,2	570,33	66,33	37,83
	10,1	570,67	54,33	31,01
	20,2	575,33	25,00	14,38
	47,7	576,33	11,00	6,34
	100,1	577,00	5,54	3,19
	390	576,33	1,45	0,83
	820	576,67	0,69	0,40
	387k	575,67	1,01	0,58

## Příloha C: Frekvenční odezva soustavy pro měření piezoaktuátoru – závaží 5 g

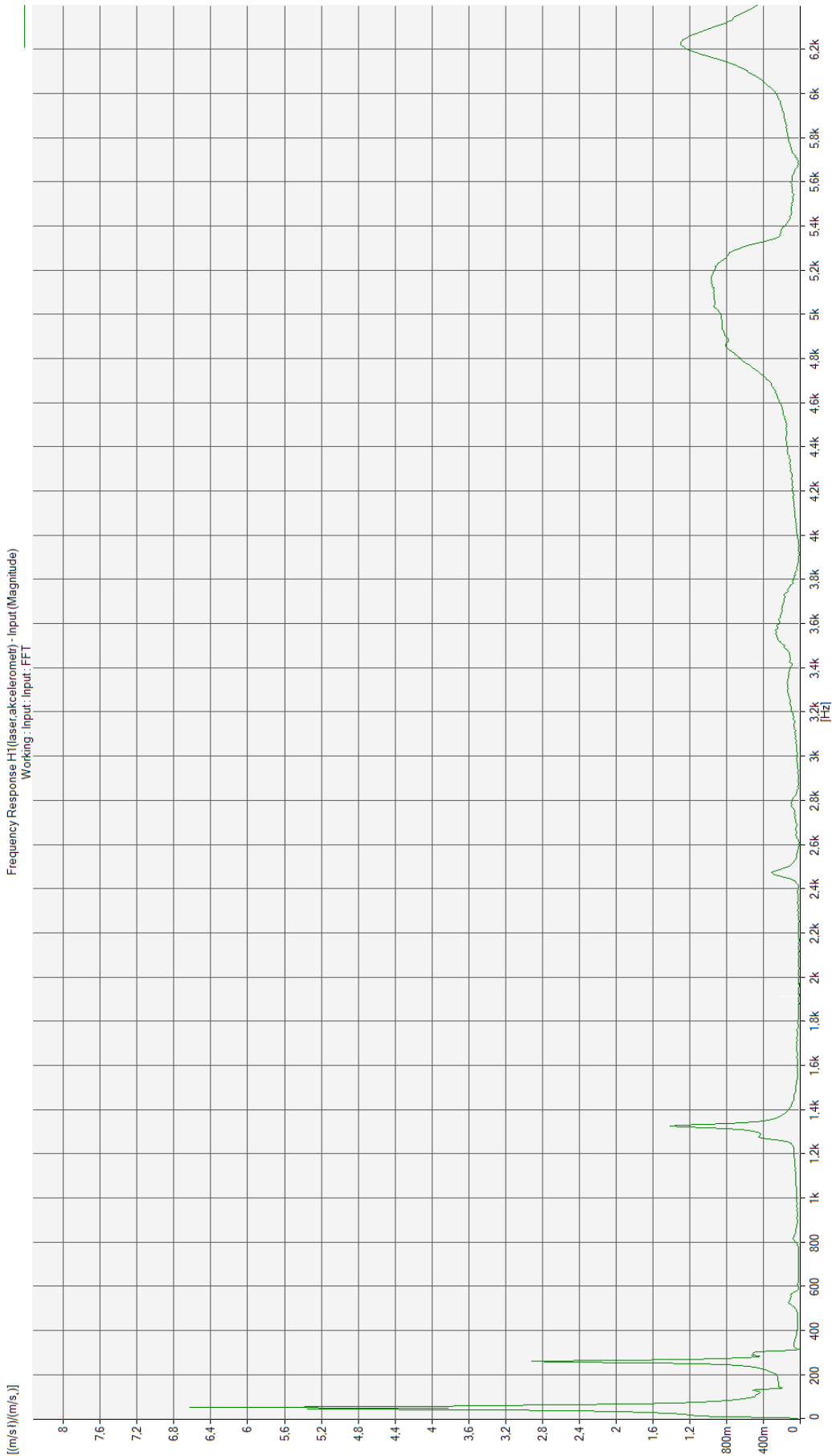


**Obrázek I** Frekvenční odezva soustavy pro měření piezoaktuátoru – závaží 5 g

**Příloha D:** Naměřené hodnoty piezoaktuátoru - závaží 5 g (bez zátěže, se zátěží 1026  $\Omega$ )**Tabulka III** Naměřené hodnoty piezoaktuátoru - závaží 5 g (bez zátěže, se zátěží 1026  $\Omega$ )

	Nulová zátěž		Zátěž $R_Z = 1026 \Omega$						
$f$	$U_0$	$I_{ZKR}$	$U_R$	$I_R$	$P$	$\Delta_{AKC}$	$\Delta_{LAS}$	$\Delta_A$	$k$
Hz	mV	$\mu A$	mV	$\mu A$	$\mu W$	$\mu m$	$\mu m$	$\mu m$	-
20	97,8	6,1	6,5	6,1	0,0	196,0	212,3	16,3	1,1
40	331,6	36,0	38,9	37,8	1,5	148,1	181,9	33,8	1,2
60	522,4	85,8	91,2	88,4	8,1	82,0	129,4	47,4	1,6
80	752,1	170,0	179,0	172,8	30,9	43,6	113,0	69,4	2,6
100	1697,0	565,5	570,5	541,7	309,1	21,0	188,9	167,9	9,0
108	2557,0	847,8	764,5	727,1	555,9	19,7	206,7	187,0	10,5
120	2140,2	551,4	543,7	519,7	282,6	19,2	116,2	97,0	6,0
140	606,1	195,9	197,1	189,7	37,4	12,6	30,3	17,8	2,4
160	312,6	120,5	120,0	115,5	13,9	8,6	13,4	4,8	1,6
180	192,5	84,7	82,2	78,2	6,4	6,6	7,2	0,6	1,1
200	137,2	67,9	64,5	61,8	4,0	4,9	4,3	-0,6	0,9
400	31,3	29,5	22,1	20,4	0,4	1,4	1,2	-0,2	0,9
600	38,1	55,2	32,6	29,6	1,0	1,3	1,7	0,4	1,3
660	57,6	99,7	52,6	47,5	2,5	1,3	2,0	0,7	1,5
700	139,4	317,7	139,0	124,9	17,4	1,4	3,3	2,0	2,4
712	597,2	670,1	371,7	339,6	126,2	0,7	6,0	5,3	8,4
740	137,6	190,3	108,1	98,7	10,7	1,1	2,8	1,8	2,7
780	40,2	66,0	34,3	31,1	1,1	0,8	1,7	0,8	2,0
840	18,7	29,5	14,4	13,0	0,2	1,3	1,4	0,1	1,1
1100	10,9	3,7	3,4	3,3	0,0	1,1	1,3	0,2	1,1
1380	12,4	19,5	7,1	6,4	0,0	1,1	1,3	0,2	1,2
1440	17,5	46,4	15,1	13,4	0,2	1,0	1,3	0,3	1,3
1480	53,8	188,3	62,6	55,9	3,5	1,3	1,6	0,2	1,2
1488	94,5	290,4	85,7	76,8	6,6	0,8	1,5	0,7	1,8
1500	68,9	207,6	58,2	53,2	3,1	1,1	1,7	0,6	1,6
1540	20,8	59,3	17,0	15,3	0,3	1,3	1,4	0,1	1,1
1600	13,5	28,2	8,6	7,7	0,1	1,3	1,2	-0,1	0,9
2000	11,0	7,9	3,8	3,4	0,0	1,3	1,2	-0,1	1,0

**Příloha E:** Frekvenční odezva soustavy pro měření piezoaktuátoru – závaží 30 g

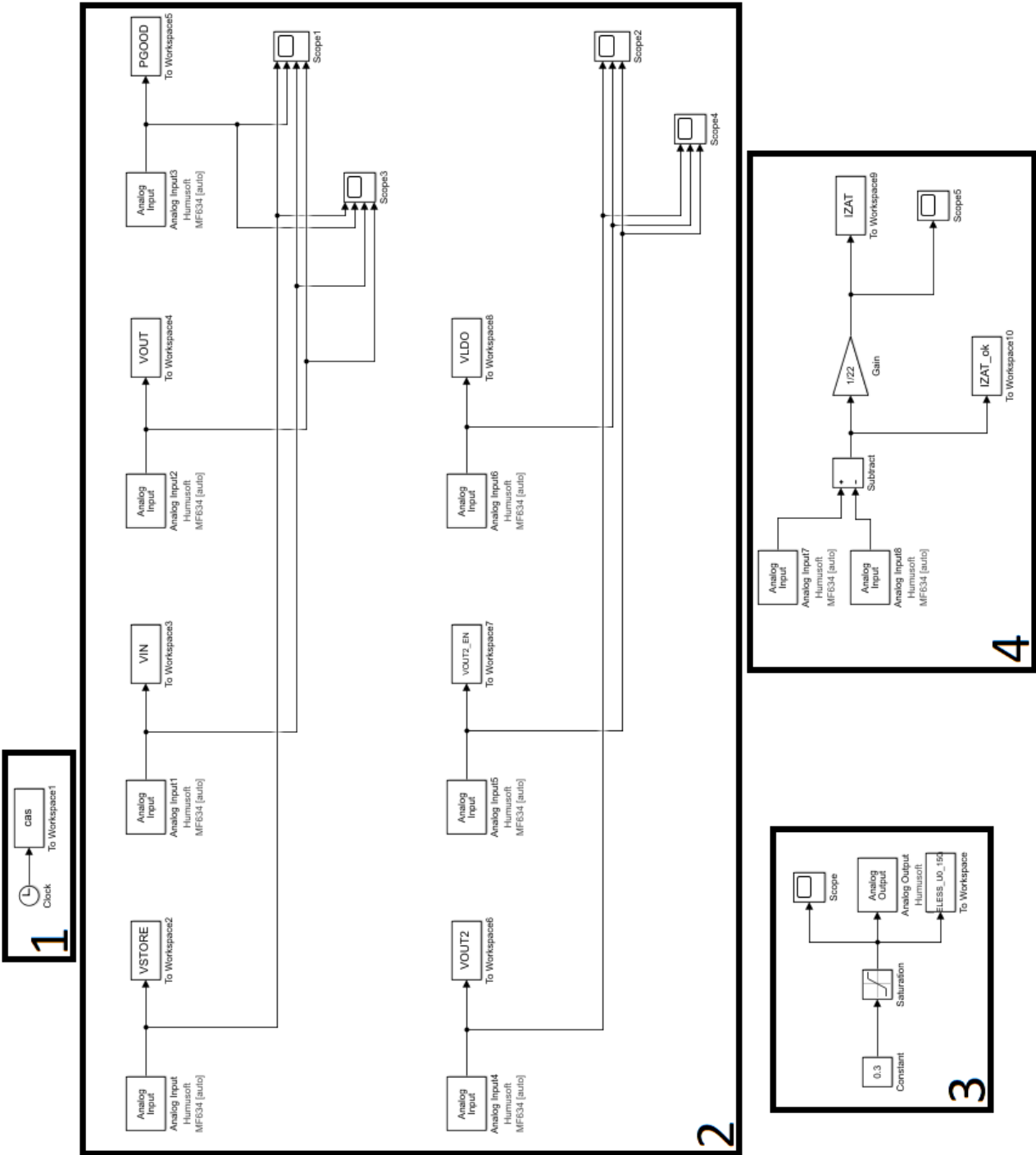


**Obrázek II** Frekvenční odezva soustavy pro měření piezoaktuátoru – závaží 30 g

**Příloha F:** Naměřené hodnoty piezoaktuátoru - závaží 30 g (bez zátěže, se zátěží)**Tabulka IV** Naměřené hodnoty piezoaktuátoru - závaží 30 g (bez zátěže, se zátěží 1026  $\Omega$ )

	Nulová zátěž		Zátěž $R_Z = 1026 \Omega$						
$f$	$U_0$	$I_{ZKR}$	$U_R$	$I_R$	$P$	$\Delta_{AKC}$	$\Delta_{LAS}$	$\Delta_A$	$k$
Hz	mV	$\mu A$	mV	$\mu A$	$\mu W$	$\mu m$	$\mu m$	$\mu m$	-
20	562,1	31,1	29,4	31,1	0,9	200,9	272,1	71,2	1,4
40	4378,2	585,0	589,5	572,1	337,3	134,6	540,3	405,7	4,0
44	7656,8	1248,6	1213,9	1172,1	1422,8	74,1	793,6	719,6	10,7
48	10934,6	1502,5	1465,2	1420,8	2081,8	66,1	741,8	675,7	11,2
52	8202,5	1061,7	1062,2	1026,2	1090,0	98,9	444,2	345,3	4,5
60	3852,5	566,7	573,3	557,4	319,6	89,3	170,1	80,8	1,9
80	1273,1	256,2	257,8	248,9	64,2	48,1	33,9	-14,2	0,7
120	342,5	102,8	99,4	96,8	9,6	17,7	7,2	-10,5	0,4
200	152,4	77,0	68,1	66,5	4,5	4,9	1,9	-3,0	0,4
240	233,7	149,7	126,5	119,7	15,1	3,6	2,4	-1,3	0,6
260	721,8	424,1	356,2	336,9	120,0	3,6	6,2	2,6	1,7
300	35,3	22,3	19,0	17,4	0,3	2,7	2,3	-0,4	0,9
500	14,3	4,0	3,3	2,7	0,0	1,5	1,1	-0,4	0,8
800	11,8	13,7	6,7	6,0	0,0	1,0	1,2	0,2	1,2
1304	104,9	422,3	97,7	86,9	8,5	1,3	1,2	-0,1	0,9
1324	288,1	589,2	222,3	202,9	45,1	1,3	1,4	0,1	1,1
1344	127,0	270,7	106,1	96,3	10,2	1,4	1,0	-0,4	0,7
2000	12,4	11,5	3,5	2,9	0,0	1,3	1,2	-0,2	0,9





Obrázek III Model pro měření s LTC3108